

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Приладобудівний факультет

(повна назва інституту/факультету)

Кафедра приладів і систем орієнтації та навігації

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Бурау Н.І.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

« »

2019 р.

Дипломний проект

освітньо-кваліфікаційного рівня « *бакалавр* »

(назва ОКР)

з напрямку підготовки

(спеціальності)

6.051003 «Приладобудування»

(код та назва напрямку підготовки або спеціальності)

на тему:

Датчик кутової швидкості компенсаційного типу

Виконав: студент *IV* курсу, групи *ПГ-51*

(шифр групи)

Касько Андрій Вікторович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник

асистент, Сапегін.О.М.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант

(назва розділу)

(посада, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант

(назва розділу)

(посада, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент

(підпис)

Київ – 2019 рік

ЗМІСТ

ВСТУП	11
1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА	12
1.1 Аналітичний огляд датчиків кутової швидкості	12
1.2 Опис компенсційного ДКШ	18
1.3. Математична модель компенсаційного ДКШ.....	25
2. РОЗРАХУНКОВО КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	34
2.1. Вибір конструктивної схеми	34
2.2. Визначення габаритів ДКШ	34
2.2.1 Розрахунок основних параметрів ДКШ.....	34
2.2.2. Вибір гіродвигуна.	36
2.2.3 Розрахунок поплавка рухомого вузла.	38
2.2.4. Розрахунок датчика моменту.....	39
2.2.5. Вибір опор.....	40
2.2.6. Конструктивна схема приладу	42
2.2.7. Визначення температури перегріву.	45
3. Розрахунок методичних похибок.	46
3.1. Похибка від впливу гіроскопічного моменту $H\omega_{\zeta} \sin \beta$ від перехресної кутової швидкості.....	46
3.2. Похибка від моменту центробіжних сил інерції.....	49
3.3. Похибка від впливу співмножника $\cos \beta$ в основному гіроскопічному моменті	50
4. Програмна модель ДКШ	51
ВИСНОВКИ.....	56

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	57
Додаток 1	58
Додаток 2	59
Додаток 3	60
Додаток 4	61
Додаток 5	62
Додаток 6	63

ВСТУП

Equation Chapter 1 Section 1

Компенсаційні датчики кутової швидкості (ДУС) досі широко використовуються у сучасній техніці. Розвиток технологій дозволив підвищити якісні показники цих приладів, зменшити їх собівартість, а також зменшити розміри. У зв'язку з чим ДКШ використовуються не тільки у навігаційній техніці а й у побутовій, автомобілях та різних системах. Схема і конструкція ДКШ повинна забезпечувати вимірювання кутової швидкості з необхідною точністю в заданому діапазоні частот вібраційних і лінійних перевантажень при можливих кліматичних умовах.

На сучасних літаках, ракетах і космічних кораблях датчик кутової швидкості використовують в демпферах ристання, тангажа і крену для поліпшення характеристик стійкості і керованості літака, а в автопілотах і системах автоматичного управління (САУ) – для введення в управляючу функцію сигналу, пропорційного кутовій швидкості. Крім того, ДКШ широко застосовують в рахунково-розв'язуючих приладах управління, наведення і стабілізації самонавідних снарядів, а також в системах орієнтації об'єкту в просторі, наприклад в безкарданних системах інерціальної навігації, де кутове положення об'єкту визначається шляхом інтегрування показань ДКШ [2].

Схема і конструкція повинні забезпечувати вимірювання кутової швидкості з необхідною точністю в заданому діапазоні частот вібраційних і лінійних перевантажень при можливих кліматичних умовах.

Кутову швидкість можна вимірювати як двух, так і трьохступеневими гіроскопами. Крім класичних гіроскопів можуть застосовуватися гіроскопи без носія кінетичного моменту (лазерні гіроскопи) або з корпускулярними носіями кінетичного моменту (електронні, протонні, атомні гіроскопи).

1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Аналітичний огляд датчиків кутової швидкості

1.1.1. Волоконно-оптичні гіроскопи.

Відтоді, як була продемонстрована можливість створення ВОГ, пройшло уже майже чверть століття. Перспективність їх використання в БІСОН пов'язана з потенційно високою чутливістю до кутової швидкості (порядку 10^{-3} - 10^{-4} град/год) при малих масі та габаритах, відсутністю механічних рухомих частин, низькій собівартості за масового виробництва. Найбільш значних наукових результатів в розробці ВОГ досягли групи дослідників із Стенфордського університету, Масачусетського технологічного інституту (США) і французької фірми ThomsonCSF. ВОГ як і ОКГ - оптичні датчики, які чутливі до зміни часу проходження світла в протилежних напрямках по замкненому оптичному шляху. Схема ВОГ представлена на рис.1.1.

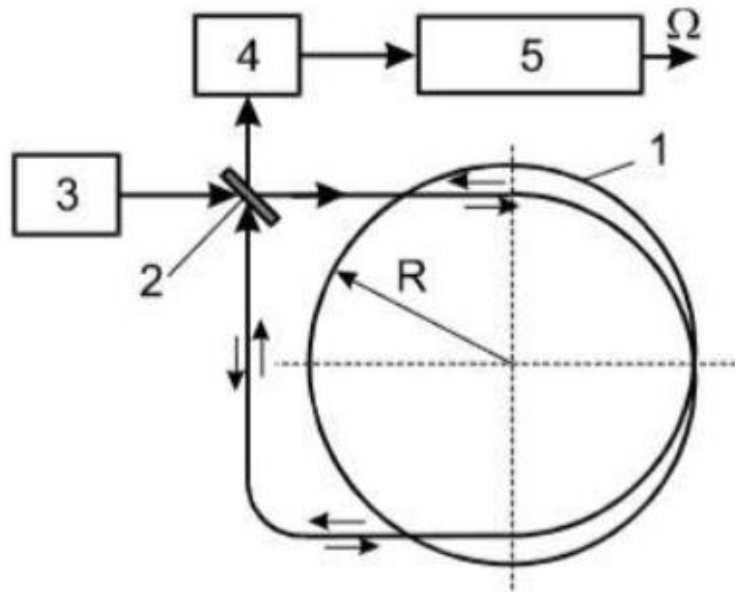


Рис. 1.1 Волоконно-оптичний гіроскоп

Різниця в часі проходження є мірою кутової швидкості. Сучасні КЛГ є приладами активного резонансного типу, в яких різниця проходження перетворюється в зміну частот генерації зустрічних світлових потоків. ВОГ може бути побудований двома способами: 1) як КЛГ, тобто з резонатором - резонаторний ВОГ (РВОГ); 2) з використанням методів прямого вимірювання фази інтерферуючих променів - інтерферометричний ВОГ (ІВОГ).

Саме ІВОГ сьогодні найбільш поширений і розробляється провідними фірмами світу. Реалізовані схеми як з розімкненим, так і замкненим зворотнім зв'язком. ІВОГ з замкненим зворотнім зв'язком забезпечує великий динамічний діапазон (більше ніж 1000 град/с) і високу лінійність масштабного коефіцієнта. Фаза визначається виразом

$$\psi_s = -2\pi \frac{LD}{c\lambda} \Omega = -K_s \Omega \quad (1.1)$$

де ψ_s - фаза Сан'яка; L і D - довжина волокна і діаметр котушки гіроскопа; c - швидкість світла в оптичному середовищі; λ - довжина джерела світла; Ω - вимірювана кутова швидкість; K_s - масштабний коефіцієнт Сан'яка.

Як видно із рівняння, характеристики ІВОГ суттєво залежать від довжини L волокна і діаметра D котушки. Великі L і D забезпечують кращі характеристики. Але збільшення L збільшує вартість ВОГ, а збільшення D збільшує його габарити та вагу. Технологія волоконно-оптичних гіроскопів прогресує із зростаючою швидкістю. Уже сьогодні деякі ВОГ мають кращі характеристики порівняно з еквівалентними їм за розмірами КЛГ. Виконана мініатюризація електроніки дозволила вперше створити ВОГ з габаритами діаметром $2,5\text{см} \times 5\text{ см}$ із вмонтованою електронікою.

1.1.2. Хвильові твердотільні гіроскопи

Багато фірм і установ провідних країн світу проводять інтенсивні розробки і дослідження ХТГ з метою максимально використати його переваги над ДНГ та отримати основний мініатюрний гіроскоп середнього класу точності. Робота ХТГ (рис. 1.2) заснована на ефекті Браїана, який полягає в тому, що в вібрувальній оболонці при обертанні її навколо осі симетрії завдяки дії сил Коріоліса відбувається прецесія пружних стоячих хвиль в інерціальному просторі. На сьогодні відомі розробки ХТГ на базі напівсферичної і циліндричної оболонки (резонатора). Різні варіанти ХТГ на базі напівсферичного резонатора з точністними характеристиками в діапазоні $0,01...1$ град/год розробила фірма Delco (США). Спектр використання ХТГ надзвичайно широкий: від чутливих елементів систем автоматичного керування наземними об'єктами до інерціальних систем, які використовуються на аерокосмічних об'єктах різного призначення. На думку провідних зарубіжних спеціалістів ХТГ знайде широке застосування найближчим часом, а його гранична точність буде визначатися тільки власними шумами електронних схем. Таким чином останніми роками йде вдосконалення як конструктивних рішень ХТГ, так і технології їх виготовлення. При цьому основними є точнісні, масогабаритні і

собівартнісні їх характеристики. Більшість конструкцій ХТГ, що вдосконалюються і модифікуються, побудовані на базі напівсферичного резонатора. Наприклад спеціалісти РПКБ (Росія) розробили ХТГ з напівсферичним резонатором діаметром 50мм. На їх думку, якщо в такому гіроскопі збільшити швидкодію і точність системи керування хвильовим полем, вдосконалити алгоритм обробки інформації і ідентифікації параметрів моделі дрейфу, а також ввести балансування резонатора за непарними гармоніками, то це дасть можливість створити гіроскоп з дрейфом порядку 0,001 О/с. Гіроскоп з напівсферичним резонатором HRG 130Y, створений американською фірмою Litton, використовується у великому діапазоні космічних застосувань. Його резонатор має діаметр 30мм, дає низькі шуми, може працювати за високої температури.

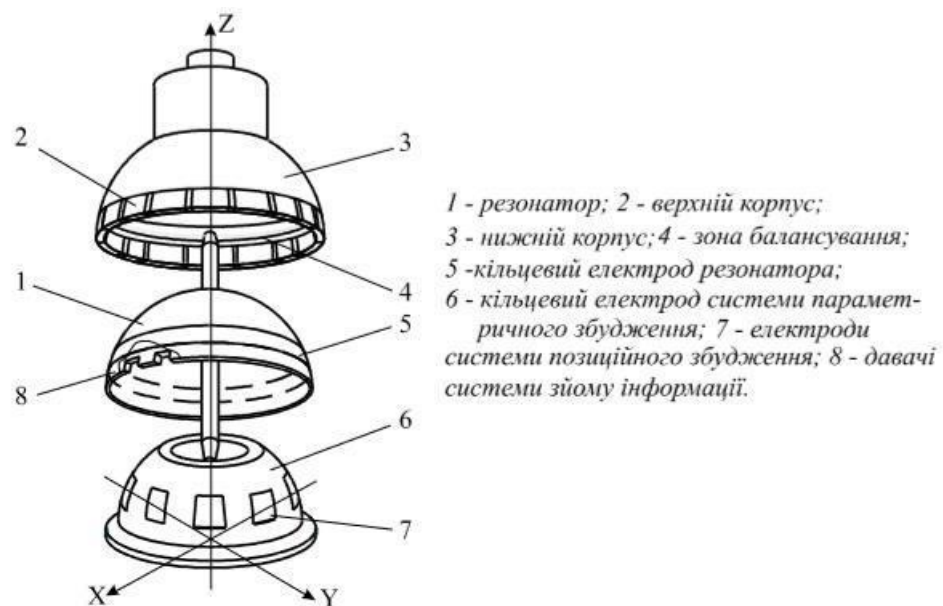


Рис. 1.2 Схема конструкції ХТГ

1.1.3. Мікромеханічні гіроскопи.

Наукові дослідження і технічні розробки щодо створення мініатюрних механічних приладів, різноманітних датчиків і виконуючих елементів на основі кремнію, що став основним матеріалом в сучасній мікроелектроніці, розпочалися в провідних державах світу ще на початку 70-х років. Патенти за

ряд технічних рішень ММГ та інших мініатюрних приладів отримали такі фірми як Draper Laboratory, Rokwell International, Systron Donner, Analog Devices, General Motors, Boeing (США), SAGEM (Франція), Murata (Японія), Каліфорнійський (Берклі) та Мічіганський університети (США). В Росії розробки мікромеханічних інерціальних датчиків первинної інформації здійснювалися з певним відставанням. Лише на початку 90-х років розпочалися теоретичні дослідження ММГ в Україні. ММГ відносяться до осциляторних вібраційних гіроскопів. В них замість традиційного обертального ротора використовується інерційна маса у вигляді однієї або декількох пластин, яка сформована на кремнієвій підкладці за допомогою травлення і закріплена у віброуючому торсіонному підвісі. Обертання основи приводить до появи кутових або лінійних коливань інерційної маси відносно вихідної осі, яка перпендикулярна осі вібрацій збудження, і за фазою та амплітудою цих коливань вимірюється кутова швидкість обертання. Серед конструктивних рішень на сьогодні відомі: ММГ карданового типу, камертонний ММГ, ММГ кільцевого (роторного) типу, планарні ММГ. Кардановий мікромеханічний гіроскоп GVG (Gimbale d Vibrating Gyro), розроблений в Charles Stark Draper Laboratory (США) в 1984 році. Згодом принцип дії, динамічні властивості і вплив на них окремих конструктивних параметрів гіроскопа вивчалися і спеціалістами Росії (НИИ ПМ им. Академика В.И. Кузнецова і НПК «Вектор», Москва, АОЗТ «Гирооптика», Санкт-Петербург), а також України (Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» (НТУУ «КПІ»)). За прогнозом спеціалістів існують шляхи досягнення точності ММГ на рівні краще ніж 10^{-3} О/годину. В 1992 році в Charles Stark Draper Laboratory почалася розробка налагоджуваного камертонного гіроскопа TFG (Tuning Fork Gyro) для автомобільної промисловості (рис. 1.3).

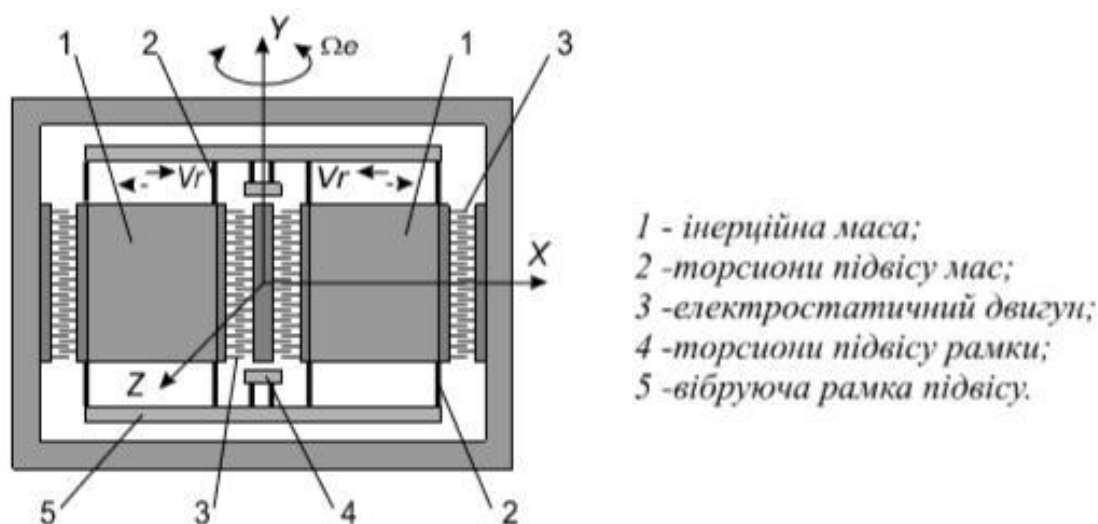


Рис. 1.3 Схема камертонового ММГ

Дослідний зразок першого ММГ цього типу був випущений фірмою Boeing (США) на початку 1997 року і з успіхом витримав випробування в американських, європейських та японських автомобілебудівників. Розмір приладу визначався електронікою і складав $6,25 \text{ см}^2$, а його дрейф коливався в межах $0,5 \text{ О/с}$. З 1997 року, включившись в розробку мікромеханічних датчиків руху, АОЗТ «Гирооптика» (Санкт-Петербург, Росія) зосередило на першому етапі свої зусилля на глибоких теоретичних дослідженнях ММГ кремнієвого типу. В Charles Stark Draper Laboratory розроблена конструкція однокомпонентного ММГ роторного типу (рис. 1.4). Подальшим розвитком роторного одновимірного ММГ є схема вимірювача кутової швидкості з двома осями чутливості, яка є вібраційним аналогом роторного ДНГ. Планарними ММГ будемо називати такі, в яких для реєстрації вихідного сигналу використовуються поступальні переміщення інерційного елемента, що відбуваються в площині збудження (рис. 1.5). На думку спеціалістів НТУУ «КПІ» (Україна) це дає можливість забезпечити достатню чутливість інерційного елемента за великого ступеню мініатюризації.

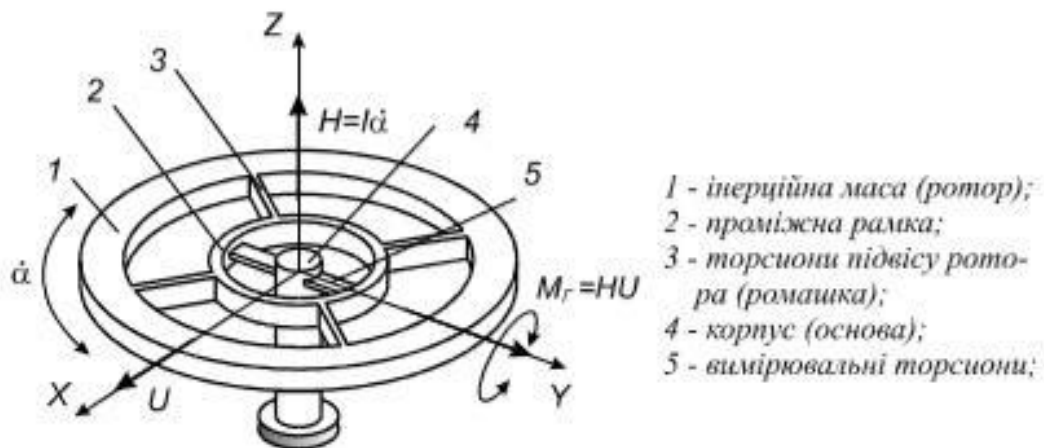


Рис. 1.4 Схема ММГ роторного типу 1

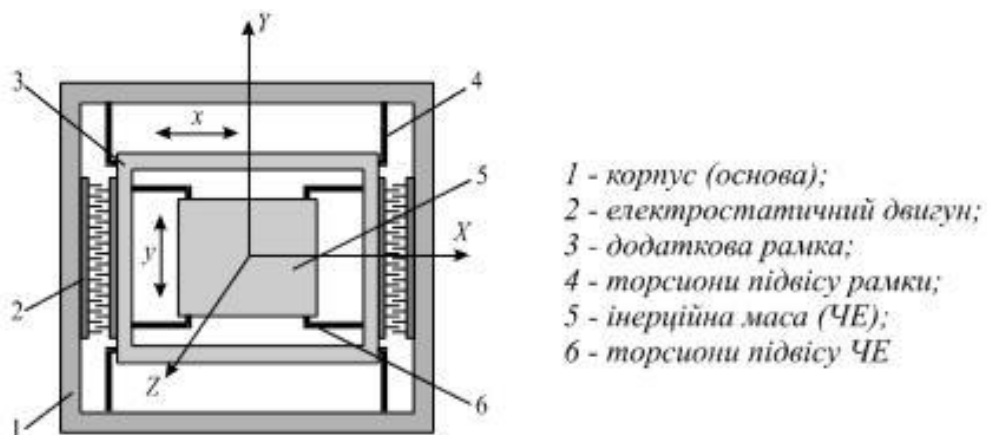


Рис. 1.5 Схема ММГ (LL) типу

На основі аналізу технічного завдання в подальшому виконую розробку датчика кутової швидкості компенсаційного типу.

1.2 Опис компенсаційного ДКШ

Гіроскопічні вимірювачі кутової швидкості призначені для вимірювання кутової швидкості обертання об'єкта, на якому вони встановлені, та використовуються як візуальні прилади та як чутливі елементи (датчики) в системах автоматичного керування і стабілізації. На сучасних літаках, ракетах і космічних кораблях ДКШ використовують в демпферах ристання, тангажа та крена для покращення характеристик

стійкості та керованості літака, а в автопілотах та системах автоматичного управління (САУ) – для введення в керуючу функцію сигналу, пропорціональну кутовій швидкості. Окрім цього, ДКШ широко застосовують в приладах керування, наведення і стабілізації самонавідних снарядів, а також в системах прицілювання танків та самохідних установок і авіаційних прицілах для виробки кута випередження зустрічі снаряду з ціллю. На супутниках і космічних кораблях датчики кутової швидкості можуть бути використані для демпфірування коливань об'єкту відносно центра його мас, а також в системах орієнтації об'єкта в просторі, наприклад в безкарданових системах інерціальної навігації, де кутове положення об'єкта визначається шляхом інтегрування показників датчика. Схема і конструкція ДКШ повинна забезпечувати вимірювання кутової швидкості з потрібною точністю в заданому діапазоні частот вібраційних і лінійних перевантажень при можливих кліматичних впливах. Умови експлуатації ДКШ аналогічні умовам експлуатації акселерометрів.

Датчик представляє собою гіроскоп з двома степенями свободи, обертання котрого навколо осі рамки (кожуха) обмеженого пружнім зв'язком з корпусом приладу.

Основними елементами датчика являються: гіродвигун; рамка або кожух гіродвигуна з напівосями (в поплавкових гіротахометрах з рідинним заповненням рамка гіродвигуна виконується в виді герметичного бачка); датчик моменту або механічна пружина, які здійснюють навколо осі рамки приладу момент, пропорційний куту її відхилення; демпфіруючий пристрій; зйомний пристрій для реєстрації кута відхилення рамки.

Гіроскопічні тахометри. Гіроскопічні тахометри відрізняються від вимірювачів кутової швидкості інших типів, в тому числі споріднених по принципу роботи (теж інерційних) центробіжних тахометрів, низьким порогом чутливості. Ця особливість робить їх придатними для вимірювання дуже малих кутових швидкостей. Найбільш розповсюджені гіротахометри

для вимірювання кутових швидкостей порядку $10^{-1} \dots 10^2$ градусів за секунду ($10^{-3} \dots 1 \text{ c}^{-1}$). Існують гіротахометри, здатні вимірювати кутові швидкості порядку швидкості обертання Землі і нижче ($10^{-4} \dots 10^{-5} \text{ c}^{-1}$). Величини кутових швидкостей, які можуть вимірювати гіротахометри, обмежуються знизу рівнем власних шумів приладу, в частості, неконтрольованими шкідливими моментами, діючими навколо осі підвісу чутливого елемента, моментом сил сухого тертя на осі підвісу. Зверху діапазон кутових швидкостей, котрі можуть вимірювати гіротахометри, обмежень не мають. Однак на практиці для вимірювання вельми великих кутових швидкостей починаючи з $10^1 \dots 10^2 \text{ c}^{-1}$ раціональніше використовувати центробіжні тахометри, більш прості по конструкції та більш дешеві. Таким чином, гіроскопічні та центробіжні тахометри не конкурують між собою, а взаємо доповнюють один одного: для вимірювання малих кутових швидкостей доцільно використовувати гіротахометри, для вимірювання великих - центробіжні тахометри. Тахогенератори, магнітні тахометри, як і центробіжні, використовують для вимірювання великих кутових швидкостей, але при відсутності потреб автономності вимірювання. Існують різні схеми побудови гіротахометрів. Кутову швидкість можна вимірювати як двох , так і трьохступенними гіроскопами. Крім класичних гіроскопів можуть застосовуватися гіроскопи без носія кінетичного моменту (лазерні гіроскопи) або з корпускулярними носіями кінетичного моменту (електронні, протонні, атомні гіроскопи). Найбільш проста та розповсюджена схема гіротахометра – схема, основана на застосуванні двохступеного гіроскопа. Гіроскоп в такій системі використовується для перетворення складової кутової швидкості основи, підлеглий вимірюванню, в механічний момент – гіроскопічний момент. Принцип роботи двохступеного гіротахометра вельми простий. Ротор гіроскопа з кінетичним моментом H , повертається разом з основою з кутовою швидкістю ω , випробує дію моменту сил інерції Коріоліса (гіроскопічного моменту).

Для того, щоб перетворити двоступеневий гіроскоп на вимірювач кутової швидкості його потрібно спорядити пружним зв'язком, що створюватиме момент сил пружності $M_{\text{пр}} = -c\beta$ відносно вимірювальної осі.

При обертанні основи в екваторній площині з кутовою швидкістю U_{xc} , спрямованого по осі x_c (осі чутливості) та кутовою швидкістю U_{yc} , спрямованого по осі y_c (так званої перехресної осі чутливості), виникає гіроскопічний момент $M_{\Gamma} = -(HU_{xc} \cos \beta + HU_{yc} \sin \beta)$, спрямований вздовж вимірювальної осі z_c . Він викличе поворот осі на кут β та деформацію пружини. У положенні рівноваги гіроскопічний момент урівноважується моментом $c\beta$ пружного зв'язку. З рівності двох моментів випливає:

$$\beta = \frac{H}{C} \cdot (U_{xc} \cos \beta + U_{yc} \sin \beta) \quad (1.2)$$

Таким чином, кут β повороту головної осі двоступеневого гіроскопа містить інформацію про величину кутової швидкості обертання основи як навкруги осі чутливості x_c , так і осі y_c , тобто екваторіальної складової кутової швидкості обертання основи.

Кутова швидкість обертання основи U_{zc} викликає появу гіроскопічного моменту $M_{\Gamma 2} = HU_{zc}$, спрямований вздовж осі x . Цей момент урівноважується реакціями опор, не викликаючи рухів головної осі.

У вірно спроектованих приладах кут повороту β не перевищує одиниць градусів, тому можна вважати, що $\cos \beta \approx 1$. Тоді можна знехтувати другою складовою в виразі

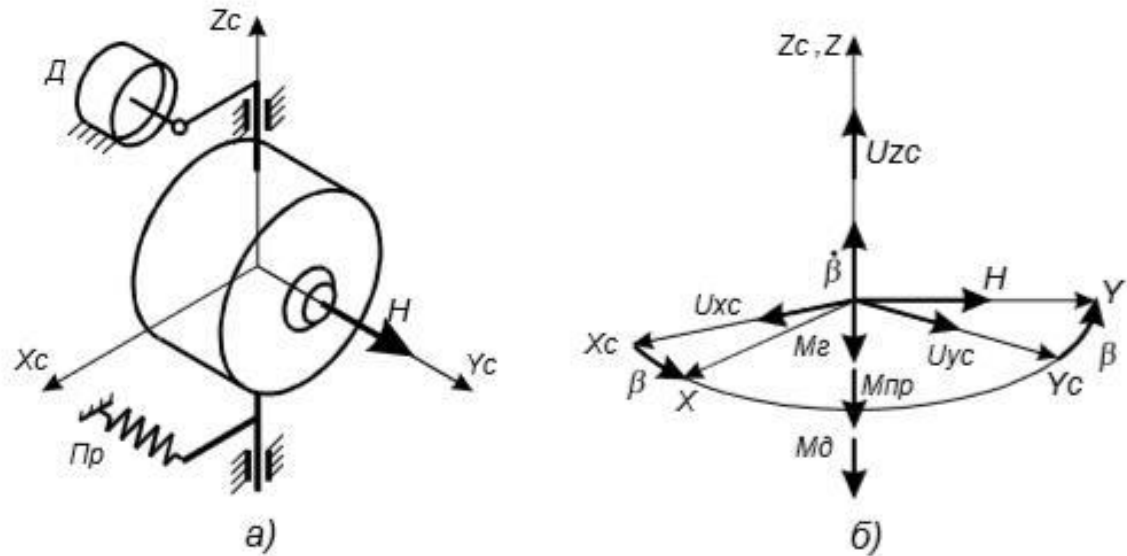


Рис. 1.6 Кінематична схема

$$\beta \approx \frac{H}{C} \cdot U_{xc} \quad (1.3)$$

Коефіцієнт пропорційності $k = \frac{H}{C}$ між вимірювальною кутовою швидкістю та кутом повороту β називають статичним коефіцієнтом передачі датчика кутової швидкості.

У ДКШ з механічним пружним зв'язком вхідна величина U перетворюється в вихідну β за схемою:

$$U \rightarrow M_r = H \cdot U \rightarrow \beta = \frac{H}{C} \cdot U \quad (1.4)$$

Рівність має силу за умов обертання основи із сталою кутовою швидкістю та відсутності збурюючих моментів після закінчення перехідного процесу встановлення положення рівноваги.

Для забезпечення згасання вільних коливань гіроскопу використовують також демпфер (заспокоювач коливань), який створює протидіючий момент, пропорційний швидкості повороту гіроскопу навкруг вимірювальної осі.

Розглянемо поведінку двостепеневого ДКШ при умові довільного обертання основи. Зв'яжемо з основою систему координат $X_c Y_c Z_c$, з рамкою гіроскопу систему координат XYZ (рис. 1.6). Взаємне розташування цих систем координат визначається кутом β . Основа обертається з довільною кутовою швидкістю U , що визначається проекціями U_{xc}, U_{yc} та U_{zc} на відповідні осі. Для складання рівнянь руху використаємо метод кінетостатики, утримуючи в рівняннях тільки моменти сил інерції обертального прискорення, гіроскопічні моменти та зовнішні моменти - збурюючі та ті, що створюються пружним зв'язком та демпфером [1].

Згідно з рис. 1.6 б гіроскопічний момент має дві складові, обумовлені обертанням основи з кутовими швидкостями U_{xc} та U_{yc} :

$$M_{\Gamma 1} = -H \cdot U_{xc} \cos \beta \text{ та } M_{\Gamma 2} = -H \cdot U_{yc} \sin \beta \quad (1.5)$$

спрямовані вздовж від'ємного напрямку вимірювальної осі.

Поява моменту сил інерції обертального прискорення обумовлена рухом гіроскопу з прискоренням $\varepsilon = \ddot{\beta} + \dot{U}_{zc}$ в інерціальному просторі відносно вимірювальної осі Z_c . Величина цього моменту дорівнює $M_o = -I_1(\ddot{\beta} + \dot{U}_{zc})$, де I_1 - момент інерції гіроскопу спільно з рамкою підвісу відносно осі Z_c . Зовнішній момент сил пружності пружин дорівнює $M_{\text{пр}} = -C\beta$ момент сил демпфірування. Головним збурюючим моментом відносно вимірювальної осі є момент сил сухого тертя $M_T = M_{T0} \text{sign} \dot{\beta}$

Згідно з методом кінетостатики проекція всіх моментів на вимірювальну вісь повинна дорівнювати нулю, тому одержимо:

$$I_1(\ddot{\beta} + \dot{U}_{zc}) + f \dot{\beta} + C\beta = -H \cdot U_{xc} \cos \beta - H \cdot U_{yc} \sin \beta - M_{T0} \text{sign} \dot{\beta} \quad (1.6)$$

або

$$I_1 \ddot{\beta} + f \dot{\beta} + C\beta = -H \cdot U_{xc} \cos \beta + M_{\Pi} , \quad (1.7)$$

де $M_{\Pi} = -H_{zc} \sin \beta - I_1 \dot{U}_{zc} - M_{T0} \text{sign} \dot{\beta}$ - сума моментів - перешкоджань, діючих вздовж вимірювальної осі.

В вірно спроектованих приладах кут повороту β не перевищує одиниць градусів, тому можна вважати, що $\cos \beta \approx 1$, а момент перешкод значно менший вимірюваного моменту $H \cdot U_{xc}$. Тому при дослідженні динаміки руху датчика кутової швидкості можна використовувати рівняння руху у вигляді:

$$I_1 \ddot{\beta} + f \dot{\beta} + C \beta = -H \cdot U_{xc} \quad (1.8)$$

Лінеаризоване рівняння часто записують також у вигляді:

$$\ddot{\beta} + 2h \dot{\beta} + \omega_0^2 \beta = \frac{H}{I_1} \cdot U_{xc}, \quad (1.9)$$

де $h = \frac{f}{2I_1}$ - коефіцієнт згасання власних коливань; $\omega_0 = \sqrt{\frac{C}{I_1}}$ - частота власних незгасаючих коливань ДКШ.

Розв'язок рівняння за умов $U_{xc} = \text{const}$, $\beta(0) = \dot{\beta}(0) = 0$ має вигляд:

$$\beta = \frac{H \cdot U_{xc}}{C} \left[1 - e^{-ht} \left(\frac{h}{\omega_1} \sin \omega_1 t + \cos \omega_1 t \right) \right], \quad (1.10)$$

де $\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - h^2}$ - частота власних згасаючих коливань рухомої частини.

В одержаному розв'язку складова $\frac{H}{C} \cdot U_{xc}$ визначає усталене відхилення головної осі від положення рівноваги, що відповідає вимірюваній кутовій швидкості U_{xc} . Складова $-\frac{H}{C} \cdot U_{xc} \cdot e^{-ht} \left(\frac{h}{\omega_1} \sin \omega_1 t + \cos \omega_1 t \right)$ визначає власні коливання, що супроводжують процес переходу рухомої частини в положення рівноваги. За умов оптимального вибору коефіцієнта згасання h , ця складова згасає за досить короткий проміжок часу. В такому випадку розв'язок рівняння співпадає з формулою.

Розглянемо вимушений рух датчика кутової швидкості, якщо вимірювана кутова швидкість змінюється по гармонійному закону $U = U_0 \sin \omega_u t$. Частковий розв'язок рівняння, який визначає вимушений рух має вигляд:

$$\beta = \frac{H}{I_1} \cdot \frac{U_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega_u^2)^2 + 4h^2 \omega_u^2}} \cdot \sin[\omega_u t - \phi(\omega_u)] , \quad (1.11)$$

де $\phi(\omega_u) = \arctg \frac{2h\omega_u}{\omega_0^2 - \omega_u^2}$ - відставання за фазою коливань головної осі від частоти кутової швидкості U .

Розв'язок можна записати також у вигляді

$$\beta = \frac{H}{C} \cdot U_0 \cdot K^* \sin[\omega_u t - \phi(\omega_u)] = k \cdot K^* \cdot U_0 \sin[\omega_u t - \phi(\omega_u)] , \quad (1.12)$$

де $K^* = \frac{1}{\sqrt{(1 - v^2)^2 + 4 \frac{h^2}{\omega_0^2} v^2}}$ - коефіцієнт динамічності, який показує, у скільки

разів амплітуда коливань рухомої частини приладу перевищує її відхилення при сталому значенні ($\omega_u = 0$) вимірюваної швидкості U_0 ; $v = \omega_u / \omega_0$ - відносна частота вимірюваної швидкості.

1.3. Математична модель компенсаційного ДКШ

Для зменшення впливу співмножника $\cos \beta$ в основному гіроскопічному моменті, а також зменшення гіроскопічного моменту $H\omega_z \sin \beta$ від перехресної кутової швидкості доцільно обмежувати максимальні відхилення рухомої частини приладу β_{\max} достатньо малими величинами, тобто вибирати велике значення жорсткості пружного зв'язку.

Збільшення жорсткості приводить крім того, до підвищення частоти власних коливань, що зменшує динамічні похибки приладу. Проте при малих кутах β важко зберегти високу точність перетворення цих кутів в електричний сигнал. Зростає також похибка приладу від нестабільності «нульового» положення пружин[3].

Для подолання цих суперечностей потрібно змінити схему перетворення вхідної величини у вихідний електричний сигнал так, щоб виключити

перетворення кута β в електричний сигнал. Можлива заміна електричних датчиків кута електричними датчиками (перетворювачами) зусилля, наприклад магнітоупругими, електрострикційними, тензометричними, або використання компенсаційного методу вимірювання гіроскопічного моменту.

Розглянемо ДКШ з компенсаційним методом вимірювання гіроскопічного моменту. Суть цього методу полягає в підборі компенсуючого моменту, рівного гіроскопічному моменту. Операцію зрівнювання компенсуючого і гіроскопічного моментів можна автоматизувати формуванням сигналу різниці цих моментів і використанням цього сигналу для управління величиною компенсуючого моменту до зведення сигналу різниці до нуля. Досягши рівності двох моментів судити про значення вхідної кутової швидкості ω_z можна по компенсуючому моменту. Перевага компенсаційного методу полягає в тому, що врівноважувати гіроскопічний момент компенсаційним можна при нульовому або майже нульовому значенні кута β .

Особливості компенсаційних ДКШ розглянемо на прикладі схеми з датчиком моменту, жорстко пов'язаним з гіродвигуном (рис. 1.7).

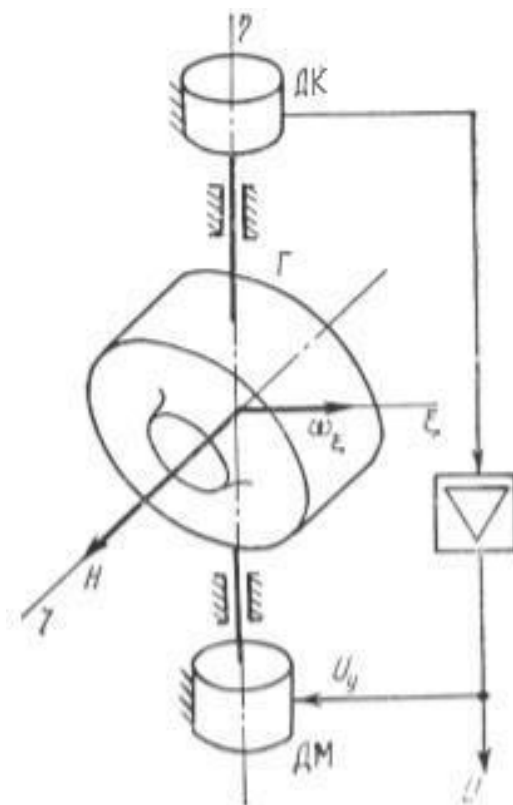


Рис. 1.7 Принцип роботи компенсаційного ДКШ

Таку схему ДКШ нерідко називають також датчиком кутової швидкості з «електричною» пружиною. У цій схемі компенсуючий момент створюється датчиком моменту (ДМ), встановленим на осі підвісу гіродвигуна. Схема компенсаційного ДКШ підвісу гіродвигуна викликає його поворот. Управляючий сигнал датчика моменту знімається з датчика кута (ДК). Він залежить від кута β повороту гіродвигуна. Зворотний зв'язок, тобто залежність моменту, що розвивається датчиком моменту, від кута β – від'ємна. Тому ланцюг зворотного зв'язку, що складається з датчика кута, підсилювача і датчика моменту, створює протидію повороту гіродвигуна від положення рівноваги, тобто ефект, аналогічний протидії пружин. Звідси і вираз «електрична» пружина[5].

Вимірювати величину компенсаційного моменту, тобто моменту, що розвивається датчиком моменту, дуже важко. Тому в якості вихідної величини приладу використовують електричний сигнал, що управляє датчиком

моменту, оскільки момент датчика моменту пропорційний управляючому сигналу.

Складемо математичну модель такої схеми, щоб на основі її аналізу виявити особливості приладу.

Рівняння руху гіродвигуна запишемо у вигляді

$$J_y \ddot{\beta} + f \dot{\beta} = H \omega_\xi + M_{\text{дм}}, \quad (1.13)$$

де $M_{\text{дм}}$ момент, що прикладається з боку датчика моменту.

Вплив моментів-перешкод не враховуємо. Їх вплив аналогічний впливу моменту $H \omega_\xi$.

Рівняння датчика кута і підсилювача мають вигляд:

$$U_{\text{дк}} = \pm k_{\text{дк}} \beta; \quad T_y \dot{U}_y + U_y = k_y U_{\text{дк}}. \quad (1.14)$$

тут T_y , k_y , U_y – постійна часу, коефіцієнт підсилення і вихідний сигнал підсилювача. Подвійний знак в першому рівнянні враховує два можливі варіанти включення зворотного зв'язку.

Рівняння датчика моменту залежить від типу такого датчика. Для магнітоелектричного датчика моменту рівняння руху можна записати як рівняння двигуна постійного струму з управлінням в ланцюзі якоря:

$$U_y = L \frac{di}{dt} + ri + n \omega_p; \quad (1.15)$$

$$M_{\text{дм}} = mi - J_{\text{д}} \left(\frac{d\omega_p}{dt} + \frac{d\omega_\eta}{dt} \right), \quad (1.16)$$

де i, L, r струм, коефіцієнт самоіндукції і активний опір ланцюга управління і вихідного ланцюга підсилювача; n, m – коефіцієнт протиелектрорушійної сили і електромеханічна постійна; $J_{\text{д}}, \omega_p$ – момент інерції і кутова швидкість ротора датчика моменту.

При використанні двофазного асинхронного датчика моменту рівняння його руху

$$M_{дм} = k_y U_y - k_\omega \omega_p - J_d (\dot{\omega}_p + \dot{\omega}_\eta) . \quad (1.17)$$

Додатково врахуємо, що при даній вбудованій конструкції датчика моменту швидкість повороту гіродвигуна і ротора датчика моменту однакові, тобто $\dot{\beta} = \omega_p$.

Перепишемо рівняння елементів даного приладу в операторній формі, припускаючи використання магнітоелектричного датчика моменту:

$$(J_y p + f) p \beta = H \omega_\xi + M_{дм} ; U_{дк} = \pm k_{дк} \beta \quad (1.18)$$

$$(T_y p + 1) U_y = k_y U_{дк} \quad (1.19)$$

$$U_y = (Lp + r)i + n\omega_p ; M_{дм} = mi - J_d p(\omega_p + \omega_\eta) \quad (1.20)$$

$$p\beta = \omega_p \quad (1.21)$$

Вважатимемо, що в якості вихідної величини використовується струм i (або пропорційне струму падіння напруги на додатковому резисторі). Тоді, виключивши проміжні змінні $U_{дк}, U_y, \omega_p$ і $M_{дм}$, зведемо систему рівнянь до наступних двох:

$$(Jp + f) p \beta - mi = H \omega_\xi ; \quad (1.22)$$

$$[n(T_y p + 1) p \mp k_{дк} k_y] \beta + (Lp + r)(T_y p + 1)i = 0 , \quad (1.23)$$

де $J = J_y + J_d$ а член $J_d p \omega_\eta$ опущений (він доданий до члена, що міститься в опущеній сумі M_{Π} моментів-перешкод).

Характеристичне рівняння даної системи

$$(Jp + f)(Lp + r)(T_y p + 1)p + m[(T_y p + 1)np \mp k_{дк} k_y] = 0 , \quad (1.24)$$

Для виконання умови стійкості останній член виразу повинен мати нижній (додатний) знак. Отже, в другому рівнянні системи потрібно вибрати також нижній знак, тобто використовувати це рівняння у вигляді :

$$U_{дк} = -k_{дк} \beta .$$

Введемо позначення $\frac{L}{r} = T_9$; $\frac{J}{f} = T_\Gamma$; $T_K = \frac{n}{k_{ДК}k_y}$ і вирішимо систему

відносно $i(p)$ і $\beta(p)$. Одержимо

$$i(p) = \frac{-k_{ДК}k_y[T_y p + 1]T_K p + 1]H\omega_\xi}{rf(T_\Gamma p + 1)(T_9 p + 1)(T_y p + 1)p + mk_{ДК}k_y[(T_y p + 1)T_K p + 1]} \quad (1.25)$$

$$\beta(p) = \frac{r(T_9 p + 1)(T_y p + 1)H\omega_\xi}{rf(T_\Gamma p + 1)(T_9 p + 1)(T_y p + 1)p + mk_{ДК}k_y[(T_y p + 1)T_K p + 1]} \quad (1.26)$$

Якщо знехтувати малими електричними постійними часу T_9 і T_y , що відображають інерційність електричних процесів в ланцюзі управління датчика моментів і в підсилювачі, то вирази (1.25) і (1.26) одержують простіший вигляд:

$$i(p) = \frac{-k_{ДК}k_y \frac{1}{r}(T_K p + 1)H\omega_\xi}{f(T_\Gamma p + 1)p + mk_{ДК}k_y \frac{1}{r}(T_K p + 1)}, \quad (1.27)$$

$$\beta(p) = \frac{H\omega_\xi}{f(T_\Gamma p + 1)p + mk_{ДК}k_y \frac{1}{r}(T_K p + 1)}, \quad (1.28)$$

З (1.26) легко одержати вираз статичного коефіцієнта передачі приладу у вигляді

$$K_i = \frac{-H}{m}. \quad (1.29)$$

Примітно, що статичний коефіцієнт передачі залежить тільки від двох параметрів, що спрощує забезпечення його високої стабільності. Зокрема, в компенсаційному ДКШ нестабільність напруги живлення датчика кута не впливає на статичний коефіцієнт передачі приладу. Використання датчика кута або підсилювача з нелінійною характеристикою або з нестабільними коефіцієнтами передачі не впливає на лінійність характеристики приладу в цілому або на стабільність його коефіцієнта передачі. Потрібно забезпечувати

лише стабільність кінетичного моменту, а також лінійність і стабільність крутизни статичної характеристики $H M_{\text{ДМ}} = mi = f(i)$ датчика моменту, тобто постійність коефіцієнта m .

Фізичне пояснення факту незалежності статичного коефіцієнта передачі, наприклад від $k_{\text{ДК}}$, дуже просте. Завдяки компенсаційному методу вимірювання в сталому режимі забезпечується рівність між гіроскопічним моментом $H\omega_{\xi}$ і моментом, що розвивається датчиком моменту $M_{\text{ДМ}} = mi$, а із статичної рівності

$$H\omega_{\xi} = mi \quad (1.30)$$

безпосередньо впливає:

$$i = \frac{H}{m} \omega_{\xi}$$

тобто вираз статичного коефіцієнта передачі, відповідний (1.29). Якщо з яких-небудь причин значення $k_{\text{ДК}}$ вдвічі зменшиться, це приведе зрештою до збільшення вдвічі усталеного кута β , що відновлює рівність (1.30).

З (1.28) виходить наступний вираз для статичних значень кутів β :

$$\beta(p)_{p=0} = \frac{H}{mk_{\text{ДК}}k_y \frac{1}{r}} \omega_{\xi} \quad (1.31)$$

З нього видно, що збільшенням коефіцієнта підсилення підсилювача k_y , можна забезпечити малість кутів β при граничних значеннях $\omega_{\xi} = \omega_{\xi \text{ max}}$.

Значення k_y обмежується зверху тільки умовою стійкості даної замкнутої схеми.

Зупинимось на одній особливості динаміки даного приладу. З виразу (1.27) видно, що демпфірування відбувається по двох каналах: за допомогою демпфера (член fp) і через вплив протиелектрорушійної сили датчика моменту (член $mk_{\text{ДК}}k_y \frac{1}{r} T_K p$). Другий канал демпфірування має перевагу перед першим. Дійсно, при $f=0$ вираз (1.27) одержує вигляд

$$i(p) = \frac{-k_{\text{ДК}} k_y \frac{1}{r} (T_K p + 1) H \omega_\xi}{J p^2 + m k_{\text{ДК}} k_y \frac{1}{r} (T_K p + 1)} \quad (1.32)$$

Структура цього виразу свідчить про відсутність динамічних похибок при постійній швидкості зміни вхідної величини. Цей висновок справедливий і при врахуванні малих електричних постійних часу. Динамічні похибки при $f=0$ з'являються лише за наявності другої і вищих похідних ω_ξ . При використанні в даному приладі в якості вихідної величини не струму, а напруги U_y управління датчиком моменту, з системи рівнянь одержимо:

$$U_y(p) = \frac{-k_{\text{ДК}} k_y (Lp + r) H \omega_\xi}{(Jp + f)(Lp + r)(T_y p + 1)p + mn(T_y p + 1)p + m k_{\text{ДК}} k_y} \quad (1.33)$$

В цьому випадку статичний коефіцієнт передачі

$$K_{U_y} = \frac{H}{m / r} \quad (1.34)$$

Коефіцієнт передачі тут залежить вже від трьох параметрів, що ускладнює забезпечення його високої стабільності. Але, наприклад, при рішенні задачі термокомпенсації магнітного потоку в датчику моменту і термокомпенсації температурної зміни моменту інерції J_0 ротора залежність від r може бути корисною, оскільки залежно від вибору матеріалу обмотки температурний коефіцієнт опору r може бути як додатним, так і від'ємним.

Зупинимось на параметрах механічного руху приладу. Характеристичне рівняння має четвертий степінь, що ускладнює його аналіз в загальному вигляді. Якщо не враховувати малі електричні постійні часу, вважаючи, $T_\Omega = T_y = 0$, характеристичне рівняння одержить простий вигляд:

$$J p^2 + (f + \frac{mn}{r}) p + m k_{\text{ДК}} k_y \frac{1}{r} = 0 \quad (1.35)$$

В цьому випадку квадрат частоти власних коливань і коефіцієнт загасання визначаються формулами:

$$\omega_0^2 = \frac{mk_{\text{ДКШ}}k_y}{Jr}; \quad (1.36)$$

$$h = \frac{f + \frac{mn}{r}}{2j}; \quad (1.37)$$

Видно, що збільшенням k_y можна одержати частоту ω_0 достатньо великою, тобто забезпечити малі частотні похибки.

Підводячи підсумки аналізу, виділимо наступні переваги компенсаційних ДКШ в порівнянні з ДКШ з пружним зв'язком:

- усунення впливу нестабільності нульового положення пружних елементів і неідеальності їх пружних властивостей;
- відсутність впливу нелінійності датчика кута і нестабільності його коефіцієнта передачі на лінійність характеристики і стабільність коефіцієнта передачі приладу в цілому, незалежність показань приладу від коливань напруги живлення датчика кута;
- можливість досягнення малих похибок від перехресної кутової швидкості ω_ξ і мультиплікативної перешкоди $\cos\beta$ обмеженням β_{max} малими величинами;
- можливість зниження динамічних похибок забезпеченням високої частоти власних коливань;
- зручність отримання вихідного сигналу в дискретному вигляді застосуванням імпульсного зворотного зв'язку.

Головний недолік розглянутого приладу – ускладненість його схеми і конструкції у зв'язку з використанням датчика моменту і підсилювача.

2. РОЗРАХУНКОВО КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

Equation Section (Next)

2.1. Вибір конструктивної схеми

Спочатку визначимо значення добротності приладу: $\frac{\omega_{\zeta \max}}{\omega_{\zeta \min}} = \frac{70}{0,1} = 700$.

При добротності 700 краще використовувати ДКШ з електричною пружиною. Враховуючи значні величини навантажень $\dot{V}_\eta, \dot{V}_\xi$ та \dot{V}_ζ великий діапазон змін температури навколишнього середовища від -50°C до $+50^\circ\text{C}$ при недоступності термостатування, та малому значенні $\omega_{\zeta \min} = 0,1(1/\text{с})$ зупинимось на ДКШ поплавкового типу з повним зважуванням рухомого вузла[2, 4].

Виходячи з даного температурного діапазону й неприпустимості термостатування, вибираємо рідину з $\gamma_{\text{ж}} = 1 \cdot 10^4 (\text{Н/м}^3)$. Згідно з рекомендаціями вибираємо датчик моменту магнітоелектричного типу з рухомою котушкою, тому що він застосовується в ДКШ середнього та високого класу точності і не має гістерезисного моменту (сили), та датчик кута електромагнітного типу.

При $k_{\text{эп}} \gg k_{\text{л}} + H\omega_\eta$ залишковий сигнал і нелінійність вихідної характеристики датчика кута майже не роблять впливу на точність ДКШ.

2.2. Визначення габаритів ДКШ

2.2.1 Розрахунок основних параметрів ДКШ.

Виходячи із заданої ваги приладу $G_{\text{дкш}} = 4\text{Н}$, визначаємо його об'єм $V_{\text{дкш}}$ і площу поверхні $S_{\text{дкш}}$. При цьому враховують, що для сучасних «сухих» ДКШ і ДКШ із рідинним заповненням середня питома вага $\gamma_{\text{дкш}} = (5 \div 5,5) \cdot 10^4 (\text{Н/м}^3)$

, для приладів з повним зважуванням рухомого вузла $\gamma_{\text{ДКШ}} = 3 \cdot 10^4 \text{ (Н/м}^3\text{)}$ при використанні зважуючої рідини з питомою вагою $\gamma_{\text{ж}} = 2 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^3$ і $\gamma_{\text{ж}} = 3 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^3$ при $\gamma_{\text{ж}} = 1 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^3$ (Особливістю тяжких рідин $\gamma_{\text{ж}} = 2 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^3$ є те, що вони затвердіють при мінусових температурах, тому в приладах, призначених для експлуатації при мінусових температурах, використовують рідину з $\gamma_{\text{ж}} = 1 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^3$). [2].

$$\gamma_{\text{ДКШ}} = 3 \cdot 10^4 \text{ (Н/м}^3\text{)} .$$

$$V_{\text{ДКШ}} = \frac{G_{\text{ДКШ}}}{\gamma_{\text{ДКШ}}} = \frac{4}{3 \cdot 10^4} = 1,33 \cdot 10^{-4} \text{ (м}^3\text{)} = 133 \text{ (см}^3\text{)} \quad (2.1)$$

Раціонально спроектований ДКШ із електричною пружиною має вигляд циліндра, довжина якого $L_{\text{ДКШ}}$ приблизно в 2,5 рази перевищує його діаметр $D_{\text{ДКШ}}$.

Отже:

$$D_{\text{ДКШ}} = \sqrt[3]{\frac{4V_{\text{ДКШ}}}{2,5 \cdot \pi}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 1,33 \cdot 10^{-4}}{2,5 \cdot \pi}} = 0,041 \text{ (м)} \approx 4,1 \text{ (см)} \quad (2.2)$$

$$L_{\text{ДКШ}} = 2,5 \cdot D_{\text{ДКШ}} = 10,25 \text{ (см)}; \quad (2.3)$$

Площа поверхні ДКШ $S_{\text{ДКШ}}$:

$$S_{\text{ДКШ}} = 3 \cdot \pi \cdot D_{\text{ДКШ}}^2 = 3 \cdot 3,14 \cdot 0,087^2 = 0,0158 \text{ (м}^2\text{)} = 158 \text{ (см}^2\text{)} . \quad (2.4)$$

У випадку термостатованого приладу $t_{p \text{ max}} = t_{\text{термостата}}$ (звичайно 70-75°C). Для нетермостатованих приладів $t_{p \text{ max}} = 80 \div 90^\circ \text{C}$

P - припустима потужність, яка може виділятися елементами ДКШ:

$$P_{\text{ДКШ}} = \alpha k_1 S_{\text{ДКШ}} (t_{p \text{ max}} - t_{c \text{ max}}) , \quad (2.5)$$

де $\alpha = 7 \div 9 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{град)}$ (для повітря при нормальному тиску; конвекція вільна);

$k_1 = 1,2 \div 1,5$ - коефіцієнт, що враховує теплопередачу через елементи кріплення ДКШ до об'єкта.

$$P_{\text{ДКШ}} = 1,2 \cdot 7 \cdot 9,83 \cdot 10^{-3} \cdot (90^\circ - 60^\circ) \text{Вт} = 2,477 \text{ (Вт)}$$

2.2.2. Вибір гіродвигуна.

Тепер розподілимо потужність між гіродвигуном та датчиком моменту приладу. При цьому врахуємо, що потужність, яка виділяється іншими елементами ДКШ (датчик кута, віброопори), для раціонально спроектованого приладу не перебільшує 10% від загальної потужності.

Виходячи із значення потужності вибираємо гіродвигун симетричної конструкції з стальним ротором та частотою обертання 24000 об/хв. Для розподілення отриманої потужності між гіродвигуном $P_{\text{ГМ}}$ та датчиком моменту $P_{\text{ДМ}}$ складемо таблицю 1.

Таблиця 1

H (Н · см · с)	$P_{\text{ГМ}}$ (Вт)	$G_{\text{ГМ}}$ (Н)	$0,8 M_{\text{max}}$ (Н · см)	$P_{\text{ДМ}}$ (Вт)	$G_{\text{ДМ}}$ (Н)	$G_{\text{ДМ}} + G_{\text{Г.М}}$ (Н)	$V_{\text{ПУ}}$ (м ³)
2,5	2,2	0,75	1,754	1,93	3,7	4,95 He проходить	-
1,5	2,05	0,55	1,05	2,08	2,1	2,65 He проходить	-
1,0	1,95	0,45	0,7	2,18	1,2	1,65 He проходить	$0,91 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ He проходить
0,5	1,85	0,4	0,35	2,28	0,6	1,0 проходить	$0,74 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ проходить

де $G_{ГМ}$, $G_{ДМ}$ – вага гіродвигуна та датчика моменту; $P_{ГМ}$, $P_{ДМ}$ – потужності гіродвигуна та датчика кута; $V_{ПВ}$ – об'єм рухомого вузла ДКШ.

Розглянемо різні гіродвигуни з різними значеннями кінетичного моменту і виберемо з них той, котрий буде найбільш задовольняти нашим потребам.

- Для гіродвигуна з кінетичним моментом $H = 2,5(\text{Н} \cdot \text{см} \cdot \text{с})$:
 $M = 0,8 \cdot M_{\max} = 0,8 \cdot H \cdot \omega_{\zeta \max} = 0,8 \cdot 2,5 \cdot 1,22 = 2,443(\text{Н} \cdot \text{см})$

Потужність датчика моменту $P_{ДМ}$ знайдемо з наступного виразу

$$P_{ДМ} = 0,9P_{ДКШ} - P_{ГМ} = 0,9 \cdot 2,477 - 2,2 = 0,0293(\text{Вт})$$

Значення суми ваги датчика моменту і гіромотору не повинно перевищувати половину ваги проектного датчика кутової швидкості

$$G_{ДМ} + G_{ГМ} \leq 0,5G_{ДКШ} \leq 2(\text{Н}).$$

$$G_{ДМ} + G_{ГМ} = 3,75 + 0,75 = 4,45(\text{Н}).$$

Даний гіродвигун не задовольняє умовам.

- Для гіродвигуна з кінетичним моментом $H = 1,5(\text{Н} \cdot \text{см} \cdot \text{с})$
 $M = 0,8 \cdot M_{\max} = 0,8 \cdot H \cdot \omega_{\zeta \max} = 0,8 \cdot 1,5 \cdot 1,22 = 1,464(\text{Н} \cdot \text{см})$

Потужність датчика моменту $P_{ДМ}$ знайдемо з наступного виразу

$$P_{ДМ} = 0,9P_{ДКШ} - P_{ГМ} = 0,9 \cdot 2,477 - 2,05 = 0,1793(\text{Вт})$$

Значення суми ваги датчика моменту і гіромотору не повинно перевищувати половину ваги проектного датчика кутової швидкості

$$G_{ДМ} + G_{ГМ} \leq 0,5G_{ДКШ} \leq 2(\text{Н}).$$

$$G_{ДМ} + G_{ГМ} = 2,1 + 0,55 = 2,65(\text{Н}).$$

Даний гіродвигун не задовольняє умовам.

- Для гіродвигуна з кінетичним моментом $H = 1,0(\text{Н} \cdot \text{см} \cdot \text{с})$
 $M = 0,8 \cdot M_{\max} = 0,8 \cdot H \cdot \omega_{\zeta \max} = 0,8 \cdot 1,0 \cdot 1,22 = 0,976(\text{Н} \cdot \text{см})$

Потужність датчика моменту P_{DM} знайдемо з наступного виразу

$$P_{DM} = 0,9P_{ДКШ} - P_{ГМ} = 0,9 \cdot 2,477 - 1,95 = 0,2793(\text{Вт})$$

Значення суми ваги датчика моменту і гіромотору не повинно перевищувати половину ваги проектного датчика кутової швидкості

$$G_{DM} + G_{ГМ} \leq 0,5G_{ДКШ} \leq 2(\text{Н}).$$

$$G_{DM} + G_{ГМ} = 1,2 + 0,45 = 1,65(\text{Н}).$$

Даний гіродвигун задовольняє умові $G_{Д.М} + G_{ГМ} \leq 0,5G_{ДКШ} \leq 2(\text{Н}).$

- Для гіродвигуна з кінетичним моментом $H = 0,5(\text{Н} \cdot \text{см} \cdot \text{с})$

$$M = 0,8 \cdot M_{\max} = 0,8 \cdot H \cdot \omega_{\zeta \max} = 0,8 \cdot 0,5 \cdot 1,22 = 0,488(\text{Н} \cdot \text{см})$$

Потужність датчика моменту P_{DM} знайдемо з наступного виразу

$$P_{DM} = 0,9P_{ДКШ} - P_{ГМ} = 0,9 \cdot 2,477 - 1,85 = 0,3793(\text{Вт})$$

Значення суми ваги датчика моменту і гіромотору не повинно перевищувати половину ваги проектного датчика кутової швидкості

$$G_{DM} + G_{ГМ} \leq 0,5G_{ДКШ} \leq 2(\text{Н}).$$

$$G_{DM} + G_{ГМ} = 0,6 + 0,4 = 1,0(\text{Н}).$$

Даний гіродвигун задовольняє умові $G_{DM} + G_{ГМ} \leq 0,5G_{ДКШ} \leq 2(\text{Н}).$

2.2.3 Розрахунок поплавка рухомого вузла.

Для приладів, маючих датчик моменту з рухомою котушкою, вага рухомого вузла:

$$G_{ПВ} = 1,1 \cdot (G_{ГМ} + G_{DM}) . \quad (2.6)$$

$$G_{ПВ} = 1,1 \cdot (0,4 + 0,6) = 1,1(\text{Н})$$

Тоді об'єм рухомого вузла

$$V_{ПВ} = G_{ПВ} / \gamma_{ж} \quad (2.7)$$

$$V_{ПВ} = 1,1 / (2 \cdot 10^4) = 0,55 \cdot 10^{-4}(\text{м}^3) = 55(\text{см}^3)$$

Об'єм рухомого вузла $V_{п.у}$ отриманий за формулою (2.7) не повинен перевищувати 45 - 50% $V_{дкш}$ при $\gamma_{ж} \approx 1 \cdot 10^4$ (Н/м).

$$0,5V_{дкш} = 0,5 \cdot 1,33 \cdot 10^{-4} = 0,665 \cdot 10^{-4} (\text{м}^3)$$

$$0,55 \cdot 10^{-4} < 0,665 \cdot 10^{-4} - \text{умова виконується.}$$

Таким чином, при заданих розмірах та умовах експлуатації оптимальне значення кінетичного моменту гіродвигуна буде $H = 0,5$ (Н·см·с)

Діаметр поплавка:

$$D_{п.у} = 0,8D_{дкш} \quad (2.8)$$

$$D_{п.у} = 0,8 \cdot 4,1 = 3,28 (\text{см})$$

Довжина поплавка:

$$L_{п.у} = V_{п.у} \cdot 4 / (\pi \cdot D_{п.у}^2) \quad (2.9)$$

$$L_{п.у} = 55 \cdot 4 / (3,14 \cdot 3,28^2) = 6,5 (\text{см})$$

2.2.4. Розрахунок датчика моменту.

Об'єм датчика моменту $V_{дм}$ розрахуємо за формулою:

$$V_{дм} = \frac{G_{дм}}{\gamma_{дм}} \quad (2.10)$$

$$V_{дм} = \frac{0,6}{6,25 \cdot 10^4} = 0,096^{-4} (\text{м}^3) = 9,6 (\text{см}^3)$$

де $\gamma_{дм} = 6,25 \cdot 10^4 (\frac{\text{Н}}{\text{м}^3})$ - середня питома вага датчика моменту.

Діаметр датчика моменту $D_{дм}$:

$$D_{дм} = 0,8D_{дкш} \quad (2.11)$$

$$D_{дм} = 0,8 \cdot 4,1 = 3,28 (\text{см})$$

Довжина датчику моменту $L_{дм}$:

$$L_{дм} = V_{дм} \cdot 4 / (\pi \cdot D_{п.у}^2) \quad (2.12)$$

$$L_{DM} = 9,6 \cdot 4 / (3,14 \cdot 3,28^2) = 1,1(\text{см})$$

2.2.5. Вибір опор.

Виходячи з отриманого значення кінетичного моменту, знайдемо допустимий рівень діючих на рухомий вузол шкідливих моментів

$$M_{\text{вр}} \leq \omega_{\zeta \min} \cdot H = \frac{0,5 \cdot \pi \cdot 0,1}{180} = 8,726 \cdot 10^{-4} (\text{Н} \cdot \text{см}) \quad (2.13)$$

До шкідливих моментів ДКШ відносять:

$M_{\text{тр}}$ – момент тертя, який визначається типом передбачуваних опор рухомого вузла.

$M_{\text{розб}}$ – момент розбалансованості рухомого вузла, який визначається зсувом центру мас і центру тиску рухомого вузла.

$M_{\text{тяж}}$ – момент тяжіння, діючий на рухомий вузол при узгодженому положенні датчика кута.

Для етапу попереднього проектування отримаємо:

$$\omega_{\zeta \min} = \frac{\omega_{\zeta \min}}{1800} = 0,0000556 \text{ град} / \text{с}$$

$$M_{\text{вр}} = \sqrt{M_{\text{тр}}^2 + 2M_{\text{тр.рег}}^2} + \Delta M_{\text{вр}} ; \quad (2.14)$$

$$M_{\text{тр.}} = M^* + K_{\text{тр.пад.}} + K_{\text{тр.ос.}}$$

Де $M_{\text{тр}}$, $M_{\text{тр.рег}}$, M^* ($M^*=0$, оскільки проектується поплавковий ДКШ) – моменти тертя, які діють на рухомий вузол в процесі експлуатації, регулювання та які не залежать від навантаження і регулювання ДКШ.

Обчислення залишкової маси (відношення залишкової ваги рухомого вузла до прискорення сили тяжіння):

$$m_{\text{зал.}} = \beta_{\text{р.}} \cdot \left(\frac{t_{\text{с max}} - t_{\text{с min}}}{2} \right) \cdot \frac{G_{\text{п.у}}}{g} \quad (2.15)$$

$$m_{\text{зал.}} = \frac{0,1}{100} \cdot \frac{50^\circ + 50^\circ}{2} \cdot \frac{1,1}{9,8} = 0,0056(\text{кг})$$

де $\beta_P = 0,1 \text{ \% / град.}$ – об'ємний коефіцієнт розширення рідини.

Обчислення реакції опор:

R_1 – осьова складова реакції опор.

$$R_1 = m_{\text{зал.}} \cdot \dot{V}_\xi \quad (2.16)$$

$$R_1 = 0,0056 \cdot 4 \cdot g = 0,07033 \text{ (Н)}$$

R_2 – радіальна складова реакції опор.

$$R = \sqrt{R_1^2 + R_2^2} \quad (2.17)$$

$$R_2 = \left| m_{\text{зал.}} \cdot \dot{V}_\xi = 0,0056 \cdot 4 \cdot g = 0,07033(\text{Н}) \right|$$

$$R_2 = \left| \frac{2 \cdot H \cdot \omega_\xi}{L} = \frac{2 \cdot 0,5 \cdot 90 \cdot \pi}{16 \cdot 180} = 0,0981(\text{Н}) \right|$$

$$R_2 = 0,2094 \text{ (Н)}$$

$$R = \sqrt{R_1^2 + R_2^2} = \sqrt{0,07033^2 + 0,0981^2} = 0,12 \text{ (Н)},$$

де $L = 0,75 \cdot L_{\text{ДКШ}} = 0,75 \cdot 21,75 = 16 \text{ (см)}$ – відстань між підшипниками.

$$M_{\text{ТР.}} = K_{\text{тр.рад}} \cdot R + K_{\text{тр.ос.}} \cdot R_1 = K_{\text{тр.рад}} \cdot 0,12 + K_{\text{тр.ос.}} \cdot 0,07033 \quad (2.18)$$

При регулюванні приладу перевантаження рівне 4g. Регулювання будемо проводити при $t_{\text{Н.П.}}$, а значить що $M_{\text{тр.рег}} \approx 0$ (в порівнянні з $M_{\text{тр}}$ приладу в умовах експлуатації). Тоді:

$$M_{\text{вр}} = M_{\text{тр}} + \Delta M_{\text{вр}} \approx K_{\text{тр.рад}} \cdot 0,12 + K_{\text{тр.ос.}} \cdot 0,07033$$

$$\omega_{\xi \min} \geq M_{\text{вр}} / H = k_{\text{тр.рад}} \cdot 0,62 + k_{\text{тр.ос.}} \cdot 0,44$$

Враховуючи, що $\omega_{\xi \min} = 0,1 \text{ (град/с)}$ розрахуємо

$$k_{\text{тр.рад}} < 0,00165 \text{ см} ; k_{\text{тр.ос.}} < 0,00165 \text{ см.}$$

Такий рівень $k_{\text{тр.рад}}$ може бути забезпечений за допомогою камневих опор. Вибравши діаметр цапфи $d_y = 0,7 \text{ мм}$, отримаємо коефіцієнт тертя

$\mu_1 = 0,037$, що в чотири рази менше, ніж коефіцієнт тертя пари «камінь-сталь». Однак, враховуючи, що наявність мастила і вібрації, створювані гіромотором, призводять до зменшення тертя в 3–5 рази, можна прийняти як опори рухливого вузла приладу камневих підшипників з $d_{\text{ц}} = 0,7$ мм.

$$d_{\text{ц}} = \frac{k_{\text{пр.рад}} \cdot \pi}{2\mu_1} = \frac{0,00165 \cdot 3,14}{2 \cdot 0,037} = 0,7 \text{ мм}$$

2.2.6. Конструктивна схема приладу

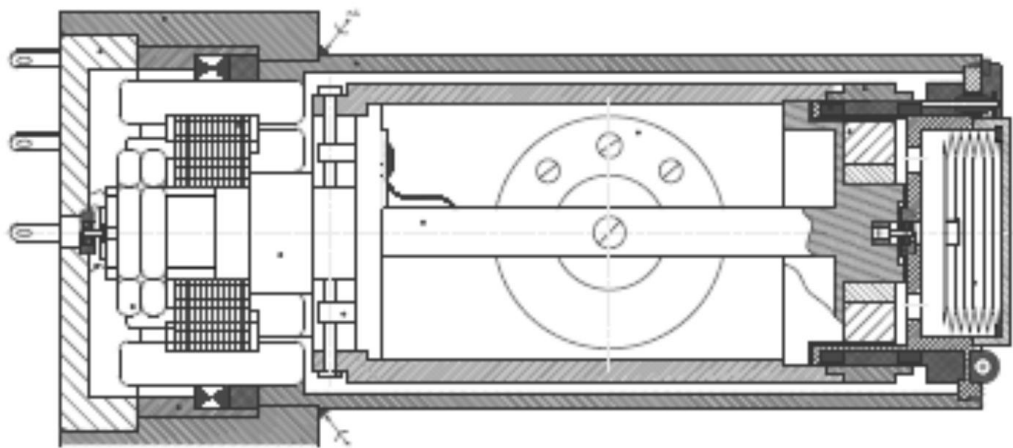


Рис. 2.1 Конструктивна схема ДКШ

Головною частиною датчика кутової швидкості являється гіродвигун, жорстко закріплений в рамці гіровузла таким чином, щоб вісь обертання ротора гіродвигуна була перпендикулярна до повздовжньої вісі гіровузла. На гіровузлі закріплені ротор трансформаторного датчика кута повороту та каркас з котушками, що входять до складу датчика моменту (електричної пружини).

В приладі, який ми розглядаємо, вихідний сигнал у вигляді напруги постійного току знімається з навантаження, підключеного послідовно з обмоткою датчика моменту. Навантаження складається з опору $R_{\text{м}}$

навантаження підсилювача, встановленого безпосередньо в підсилювачі, та додаткового резистора R_0 , встановленого у датчику кутової швидкості, що служить для регулювання тарировочної характеристики.

Датчик кутової швидкості, складається з корпусу, в якому розташований гіровузол на підшипниках. В цілях часткового розвантаження підшипників від ваги гіровузла, а також зменшення моменту тертя в опорах, прилад заповнений рідиною. До корпусу приладу гайкою кріплять магніт датчика моменту, з іншої сторони в корпус вставляють вузол датчика кута, який кріпиться до корпусу гвинтами. До вузла датчика кута кріплять панель з канавками, в котрі укладають гнучкі токопідводи. Токопідводи одним кінцем через контакти, які знаходяться на датчику кута, припаюють до контактної колоди кришки, іншими – до контактів на гіровузлі. Для уникнення механічних пошкоджень токопідводів до панелі гвинтами кріпиться шайба. Корпус приладу закривається з однієї сторони кришкою, а з іншої сільфоном та пропаюється по всьому діаметру. Вузол сільфону необхідний для компенсації температурного розширення рідини, яка заповнює внутрішню частину датчика.

Гіровузол зроблено у вигляді рамки з встановленим в ній гіродвигуном. Вісь гіродвигуна закріплена за допомогою двох спеціальних накладок та гвинта. Зовні рамка закрита тонкостінним стаканом. Внутрішня частина гіровузла заповнена воднем. Для підвода електроживлення до гіродвигуна в один з торців рамки впаяні три гермовводи. З тієї ж сторони на гіровузлі маємо чотири балансувальних гвинта, за допомогою яких гіровузол балансується відносно осі його підвісу. Крім того, на рамці гіровузла закріплено ротор датчика кута та із зворотної сторони надітий каркас з котушками датчика моменту.

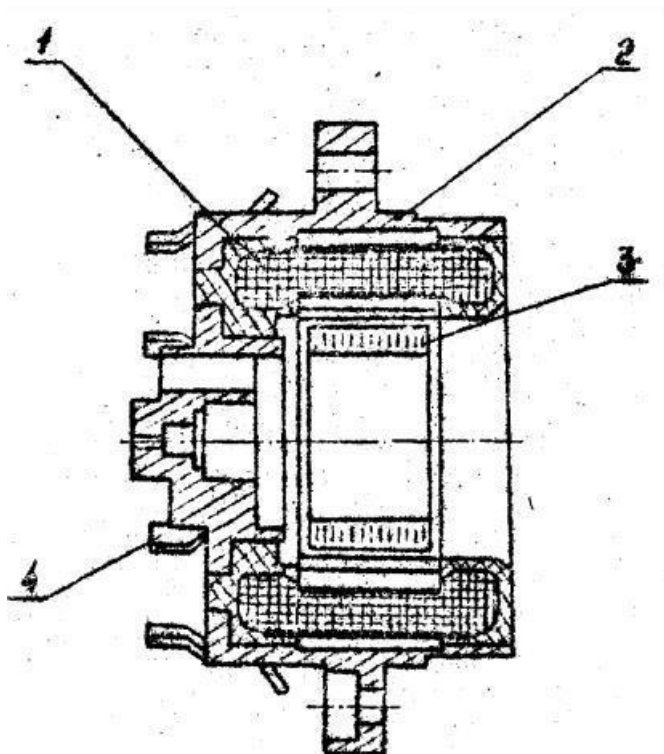


Рис. 2.2 Електричний датчик кута: 1 – статор з обмотками; 2 – основа; 3 – ротор; 4 – контакт

Датчик кута трансформаторного типу з рухомим якорем, багатополосний, призначений для перетворення кутових переміщень гіровузла в електричний сигнал. Датчик кута (рис.2.2) конструктивно складається із статора з обмотками збудження і сигнальної, основи, на якій кріпиться статор, пакету ротора з явно вираженими полюсами і контактів для підпайки проводів. Принцип дії датчика кута заснований на перерозподілі магнітних потоків, що перетинають сигнальну обмотку, внаслідок зміни магнітного опору при переміщенні зубців ротора відносно пазів статора.

Датчик моменту призначений для створення протидіючого моменту, що врівноважує гіроскопічний момент. Датчик магнітоелектричний (рис.2.3) складається із закріпленого на корпусі постійного шестиполосного магніта 1, каркаса з шістьма котушками, закріпленого на гіровузлі, і екрана, яким є корпус приладу. Він має п'ять котушок електричної пружини і одну котушку дистанційного контролю.

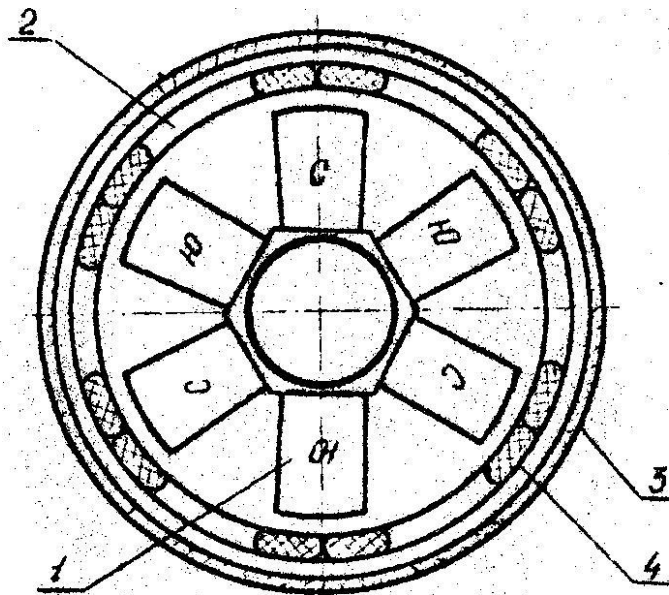


Рис. 2.3 Датчик моменту: 1 – магніт шестиполіусний; 2 – каркас котушок; 3 – екран магнітний (корпус приладу); 4 – котушки

2.2.7. Визначення температури перегріву.

Температура нульової плавучості рухомого вузла $t_{н.н}$ для нетермостабільних приладів обчислюється за формулою:

$$t_{н.н} = 0,5 \cdot (t_{с\max} + t_{с\min}) + t_{перегр} \quad (2.19)$$

$$\text{де } t_{перегр} = \frac{(P_{ДМ} + P_{ГМ} + P_{ДК} + P_0)}{k_1 S_{ДКШ} \cdot a} = \frac{(2,28 + 1,85 + 0,1(2,28 + 1,85))}{(0,0713 \cdot 1,2 \cdot 7)} = 7,5(^{\circ}\text{C}) .$$

Оскільки гідродвигун ми вибрали за допомогою розрахункової таблиці 1, то температура перегріву $t_{перегр} = t_{р\max} - t_{с\max}$ є перевіркою правильності підрахунків. Максимальна та мінімальна температури корпусу приладу відповідно будуть

$$t_{р\max} = t_{с\max} + t_{перегр} = 50^{\circ} + 7,5^{\circ} = 57,5 (^{\circ}\text{C}) ;$$

$$t_{р\min} = t_{с\min} + t_{перегр} = -50^{\circ} + 7,5^{\circ} = -42,5(^{\circ}\text{C}).$$

Таким чином температура нульової плавучості рухомого вузла буде:

$$t_{н.п} = 0,5 \cdot (t_{c \max} + t_{c \min}) + t_{перезр} = 0,5 \cdot (50^\circ - 50^\circ) + 7,5^\circ = 7,5^\circ (\text{°C})$$

Перевірка правильності підрахунків:

$$t_{перезр} = t_{p \max} - t_{c \max} = 57,5^\circ - 50^\circ = 7,5^\circ (\text{°C})$$

Тобто, розрахунок правильний.

3. Розрахунок методичних похибок.

3.1. Похибка від впливу гіроскопічного моменту $H\omega_\zeta \sin \beta$ від перехресної кутової швидкості.

$$J_y \ddot{\beta} + f\beta + c\beta = H\omega_\xi \cos \beta - H\omega_\xi \sin \beta - J_y \dot{\omega}_\eta + (J_z - J_x)(\omega_\xi \cos \beta - \omega_\zeta \sin \beta) \times \\ \times (\omega_\xi \sin \beta + \omega_\zeta \cos \beta) - M_T \text{sign} \dot{\beta} - m(p_z \omega_x - p_x \omega_z) \quad (2.20)$$

Математичну модель реакції приладу на вхідну величину ω_ξ з урахуванням розглянутої похибки і без урахування інших похибок отримаємо (2.20) у вигляді

$$c\beta = H\omega_\xi - H\omega_\zeta \sin \beta. \quad (2.21)$$

Після лінеаризації $\sin \beta$ із (2.21)

$$\beta = \frac{H\omega_\zeta}{c + H\omega_\zeta} \quad (2.22)$$

Оскільки $H\omega_\xi \ll c$, що необхідно для забезпечення невеликих відхилень по куту β , а ω_ξ і ω_ζ мають приблизно однакові значення, можна рахувати справедливим відношенням $H\omega_\zeta \ll c$. Скориставшись приближеною залежністю $\frac{1}{1 \pm \varepsilon} \cong 1 \mp \varepsilon (\varepsilon \ll 1)$, перепишемо (2.22) в більш простішому вигляді

$$\beta = \frac{H\omega_\xi}{c} \left(1 - \frac{H\omega_\zeta}{c}\right). \quad (2.23)$$

Якщо із рівняння (2.23) , враховуючи вплив розглядаючої завади, розрахувати значення $\beta = \frac{H\omega_{\xi}}{c}$ без урахування цієї перешкоди, отримаємо слідує формулу абсолютної похибки від адитивної перешкоди - $H\omega_{\xi} \sin\beta$, записану в розмірності вихідної величини β :

$$\delta_{\omega_{\xi}}^{\beta} = -\frac{H^2}{c^2} \omega_{\xi} \omega_{\xi} \quad (2.24)$$

Тут нижній індекс вказує причину похибки, а верхній, – що похибка виражена в розмірності вихідної величини приладу – кута β .

Формула (2.24) в такому випадку буде мати вигляд:

$$\delta_{\omega_{\xi}}^{\beta} = \frac{-H^2}{c^2} \omega_{\xi \max} \omega_{\xi \max} , \quad (2.25)$$

де $\omega_{\xi \max} \omega_{\xi \max}$ – максимальні значення ω_{ξ} і ω_{ξ} .

Оскільки максимальне значення вихідної величини приладу визначається (без урахування впливу перешкод) рівністю

$$\beta_{\max} = \frac{H}{c} \omega_{\xi \max} = \frac{0,5 \cdot 100 \cdot 3,14}{61,05 \cdot 180} = 0,014 \text{ (рад)} \quad (2.26)$$

$$c = \frac{H\omega_{\eta \max}}{[\delta_{\omega\eta}]_{\text{дв}}} = \frac{0,5 \cdot 0,7 \cdot 100 \cdot 3,14 / 180}{0,01} = 61,05(H \cdot i)$$

формулу (2.26) можна представити у вигляді

$$\delta_{\omega_{\xi}}^{\beta} = -\frac{H}{c} \omega_{\xi \max} \beta_{\max} = -\frac{\omega_{\xi \max}}{\omega_{\xi \max}} \beta_{\max}^2 \quad (2.27)$$

Для отримання формули розглянутої похибки в розмірності вимірюваної величини ω_{ξ} слідує привести похибку $\delta_{\omega_{\xi}}^{\beta}$ до входу приладу, тобто поділити

$\delta_{\omega_{\xi}}^{\beta}$ на статичний коефіцієнт передачі $K = \frac{H}{c}$. В результаті з урахуванням

(2.27)

$$\delta_{\omega_{\zeta}}^{\omega_{\xi}} = \frac{\delta_{\omega_{\zeta}}^{\beta}}{K} = \frac{-H}{c} \omega_{\xi \max} \omega_{\zeta \max}. \quad (2.28)$$

Чи з урахуванням (2.28),

$$\delta_{\omega_{\zeta}}^{\omega_{\xi}} = -\omega_{\xi \max} \beta_{\max} \quad (2.29)$$

Формулу максимального значення приведеної відносно похибки отримаємо, якщо формулу абсолютної похибки в розмірності β поділимо на значення $\max \beta_{\max}$ чи формулу абсолютної похибки в розмірності ω_{ξ} поділимо на $\omega_{\xi \max}$

Використавши (2.27) з урахуванням (2.28) чи (2.29), знайдемо

$$\delta_{\omega_{\xi}} = \frac{\delta_{\omega_{\zeta}}^{\beta}}{\beta_{\max}} = \frac{\delta_{\omega_{\zeta}}^{\omega_{\xi}}}{\omega_{\xi \max}} = -\frac{H}{c} \omega_{\zeta \max} = -\frac{\omega_{\zeta \max}}{\omega_{\xi \max}} \beta_{\max} = -\frac{100}{7,74} \cdot 0,014 = 0,8\% \quad (2.30)$$

Дані формули можна отримати більш простіше. Якщо максимальне значення кута повороту рухомої частини приладу β_{\max} розглядати як параметр, то максимальний вплив моменту-перешкоди $H \omega_{\zeta} \sin \beta_{\max} \cong H \omega_{\zeta} \beta_{\max}$ можна оцінити, використовуючи рівність

$$c \beta = -H \omega_{\zeta \max} \beta_{\max}.$$

Звідси безпосередньо отримуємо формулу абсолютної похибки від впливу ω_{ζ} у формі (2.29). Такий же результат можна отримати в результаті рішення (2.21) методом послідовних наближень. Формулу максимального значення відносної приведеної похибки (2.30) можна також легше отримати у вигляді відношення максимального значення $H \omega_{\zeta \max} \beta_{\max}$ розглянутого моменту-перешкоди до максимального значенню $H \omega_{\xi \max}$ корисного моменту (без урахування впливу співмножника $\cos \beta$).

Найбільш радикальний спосіб зменшення похибки ДКШ від перехресної кутової швидкості ω_{ζ} – зменшення кутів β_{\max} граничного відхилення рухомої частини приладу від положення рівноваги. Більші можливості обмеження кутів β дають схеми компенсаційних ДКШ.

3.2. Похибка від моменту центробіжних сил інерції.

$$(J_z - J_x)(\omega_\xi \cos \beta - \omega_\zeta \sin \beta)(\omega_\xi \sin \beta + \omega_\zeta \cos \beta).$$

Розглянутий момент-перешкоди не важко перетворити до вигляду

$$(J_z - J_x) \left[\frac{1}{2} (\omega_\xi^2 - \omega_\zeta^2) \sin 2\beta + \omega_\xi \omega_\zeta \cos 2\beta \right] \quad (2.31)$$

Після лінеаризації тригонометричних функцій розглянутий момент-перешкоди приймає вигляд

$$(J_z - J_x) \left[(\omega_\xi^2 - \omega_\zeta^2) \beta + \omega_\xi \omega_\zeta \right]$$

$$\text{Із статичної рівності } c\beta = (J_z - J_x) \left[(\omega_{\xi \max}^2 - \omega_{\zeta \max}^2) \beta_{\max} + \omega_{\xi \max} \omega_{\zeta \max} \right]$$

отримаємо формулу максимальної абсолютної похибки

$$\delta_{\ddot{o}}^\beta = \frac{J_z - J_x}{H} \left[(\omega_{\xi \max}^2 - \omega_{\zeta \max}^2) \beta_{\max} + \omega_{\xi \max} \omega_{\zeta \max} \right] \quad (2.32)$$

Формула аналогічній похибки в розмірності вимірюваної величини ω_ξ

$$\delta_{\ddot{o}}^{\omega_\xi} = \frac{J_z - J_x}{H} \left[(\omega_{\xi \max}^2 - \omega_{\zeta \max}^2) \beta_{\max} + \omega_{\xi \max} \omega_{\zeta \max} \right] \quad (2.33)$$

Таким же методом, що і для інших моментів-перешкод, отримаємо наступну формулу максимального значення приведеної відносної похибки:

$$\delta_{\ddot{o}} = \frac{J_z - J_x}{H} = \left[(\omega_{\xi \max} - \frac{\omega_{\zeta \max}^2}{\omega_{\xi \max}^2} \beta_{\max} + \omega_{\zeta \max} \right] \quad (2.34)$$

При малих кутових швидкостях ω_ζ і ω_ξ об'єкта похибки від впливу розглянутого моменту-перешкоди мала порівняно з похибками від інших моментів-перешкод. Очевидним зменшенням цієї перешкоди є виконання умови $J_z - J_x = 0$

3.3. Похибка від впливу співмножника $\cos \beta$ в основному гіроскопічному моменті

Формулу максимальної абсолютної похибки від розглянутої мультиплікаційної перешкоди можна отримати порівнянням значення кута β , відповідно статичній рівності $c\beta = H\omega_{\xi \max} \cos \beta_{\max}$, в якому враховується вплив співмножника $\cos \beta$ і значення кута β , відповідно рівності

$$c\beta = H\omega_{\xi \max}$$

в якому вплив цього співмножника не враховується.

Це порівняння дає

$$\delta_{\cos \beta}^{\beta} = \frac{H}{c} (\cos \beta_{\max} - 1) \omega_{\xi \max} \quad (2.35)$$

Після розкладення $\cos \beta$ в ряд Маклорена з утриманням двох членів ряду

$$\delta_{\cos \beta}^{\beta} = \frac{H}{2c} \beta_{\max}^2 \omega_{\xi \max} = -\frac{H^3}{2c^3} \omega_{\xi \max}^3 \quad (2.36)$$

Формула аналогічної похибки в розмірності вимірюваної величини ω_{ξ}

$$\delta_{\cos \beta}^{\omega_{\xi}} = \frac{\delta_{\cos \beta}^{\beta}}{K} = -\frac{1}{2} \beta_{\max}^2 \omega_{\xi \max} = -\frac{H^2}{2c^2} \omega_{\xi \max}^3 \quad (2.37)$$

Формула максимального значення приведеної відносно похибки має вигляд

$$\delta_{\cos \beta} = -\frac{1}{2} \beta_{\max}^2 = -\frac{H^2}{2c^2} \omega_{\xi \max}^3 = -\frac{0,5^2 \cdot 100^2 \cdot 3,14}{2 \cdot 61,05^2 \cdot 180} = 0,0059(\text{рад}) \quad (2.38)$$

Зменшення впливу співмножника $\cos \beta$ досягається обмеженням β_{\max} .

Вплив $\cos \beta$ проявляється в порушенні лінійності залежної $\beta = f(\omega_{\xi})$.

Не лінійність статистичної характеристики ДКШ можна компенсувати не лінійністю електричного датчика кута, що перетворює кут β в електричний

сигнал. Для цього потрібно, щоб датчик кута мав таку ж статистичну характеристику:

$$U_{вих} = \frac{k}{\cos \beta} \beta. \quad (2.39)$$

При $\beta_{\max} \leq 5...7^\circ$ бажаний вигляд статистичної характеристики циометричного датчика кута чи датчика кута типу поворотного трансформатора легко досягається вибором визначеного співвідношення між опором навантаження внутрішнім співвідношенням датчика кута.

4. Програмна модель ДКШ

Для дослідження ДКШ при різних умовах, параметрах руху основи, та конструктивних особливостей самого чутливого елементу доцільно провести програмне моделювання. Для цього було розроблено програмну модель компенсаційного ДКШ у середовищі Matlab. У якості математичної моделі для побудови програмного алгоритму було використано рівняння (1.8). При цьому розраховані параметри чутливого елементу були використані у імітаційному моделюванні.

Програмна модель складається з наступних процедур:

- Керувальна програма **main.m**
- Функція правих частин рівняння (1.8) **PrCh.m**
- Процедура імітації руху основи з кутовою швидкістю **UgSk.m**
- Процедура, що моделює момент по осях підвісу **Moment.m**

Приведемо нижче тексти цих процедур.

Програмний код:

```
clc
```

```
clear all
```

```
global H f c I
```

```
global Mx0 Mxm
```

```

global Om0 OmM om
rtd=180/pi;
dtr=pi/180;
%parametrs gir
H=5e-3; %(H*м*с) Кінет. момент
f=0.037; %Демф.
c=61.05; %(H*м*с) Жорсткість
R=1.85e-2;%m
m=4.4e-3;%(кг)маса
I=4.7e-5;%(кг*м^2)
%Парам. моментів
Mx0=0;
Mxm=0;
%Парам. кут. шв. основи
Om0=39*dtr;
OmM=0*dtr;
om=10;
Tk=10;
%Параметри чисельного інтегрування
%Початкові умови
Bt0=0*dtr;BtT0=0*dtr;
y0=[Bt0 BtT0];
[tout,yout]=ode45('PrCh',Tk,y0);
Bt=yout(:,1).*rtd;
BtT=yout(:,2).*rtd;
t=tout;
figure(1)
plot(t,Bt,'LineWidth',4),grid
xlabel('time,sec')
set(gca,'FontSize',14)

```

ylabel('\beta')

Для формування процесу чисельного інтегрування функцією *ode45* необхідно сформулювати процедуру правих частин диференціального рівняння двоступеневого гіроскопа (1.8). Рівняння записуються у безрозмірній формі Коші.

```
function z=PrCh(t,y)
global H f c I
Mx=Moment(t);
Omy=UgSk(t);
z(1)=y(2);
z(2)=(Mx+H*Omy-f*y(2)-c*y(1))/I;
z=z';
```

Процедура **UgSk.m** моделює лінійне прискорення за законом $\omega_x = \omega_o + \omega_m \sin(\lambda t)$.

```
function Omy=UgSk(t)
global Om0 OmM om
Omy=Om0+OmM*sin(om*t);
```

У процедурі **Moment.m** розраховується постійний момент, що діє на ДГ

```
function Mx=Moment(t)
global Mx0 Mxm om
Mx=Mx0+Mxm*sin(om*t);
```

```
x=[1:70];
y=[8.2e-5 1.64e-4 2.4e-4 3.3e-4 4.1e-4 4.9e-4 5.7e-4 6.5e-4 7.3e-4 8.2e-4 9e-4 9.8e-4 1.1e-3 1.15e-3 1.2e-3 1.3e-3 1.4e-3 1.48e-3 1.55e-3 1.6e-3 1.72e-3 1.8e-3 1.88e-3 1.97e-3 2e-3 2.1e-3 2.2e-3 2.3e-3 2.37e-3 2.45e-3 2.53e-3 2.6e-3 2.7e-3 2.78e-3
```

```

2.86e-3 2.94e-3 3e-3 3.1e-3 3.19e-3 3.27e-3 3.35e-3 3.43e-3 3.52e-3 3.6e-3 3.68e-3
3.76e-3 3.84e-3 3.93e-3 4e-3 4.1e-3 4.17e-3 4.25e-3 4.34e-3 4.42e-3 4.5e-3 4.58e-3
4.66e-3 4.75e-3 4.83e-3 4.91e-3 4.99e-3 5.07e-3 5.15e-3 5.24e-3 5.32e-3 5.4e-3
5.48e-3 5.56e-3 5.65e-3 5.73e-3];
plot(x,y),grid;

```

Використовуючи програмну модель можна проводити різноманітні дослідження. Проделуємо поведінку ЧЕ ДКШ при постійній кутовій швидкості. В результаті ротор гіроскопа буде відхилятися на величину, як показано на рис. 2.4

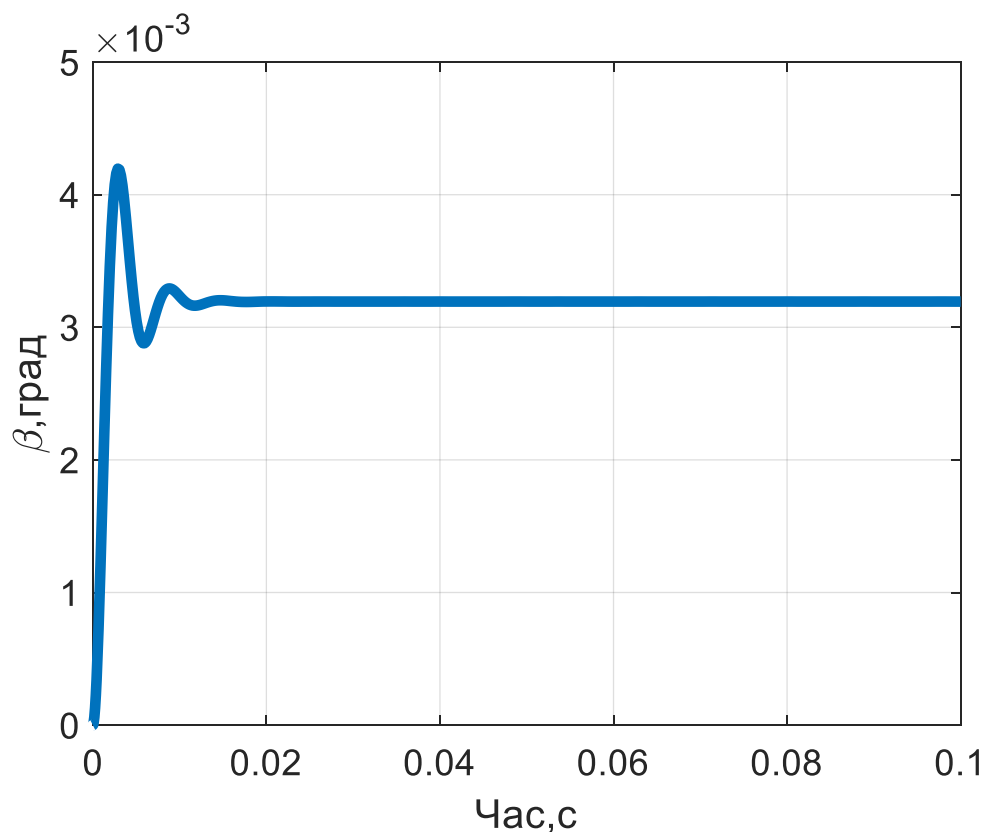


Рис. 2.4 Відхилення ротору ДКШ при постійній кутовій швидкості

Дослідимо відхилення ротору на заданому діапазоні зміни кутової швидкості. В результаті отримаємо залежність величини відхилення від величини кутової швидкості. Результати представлені на рис. 2.5

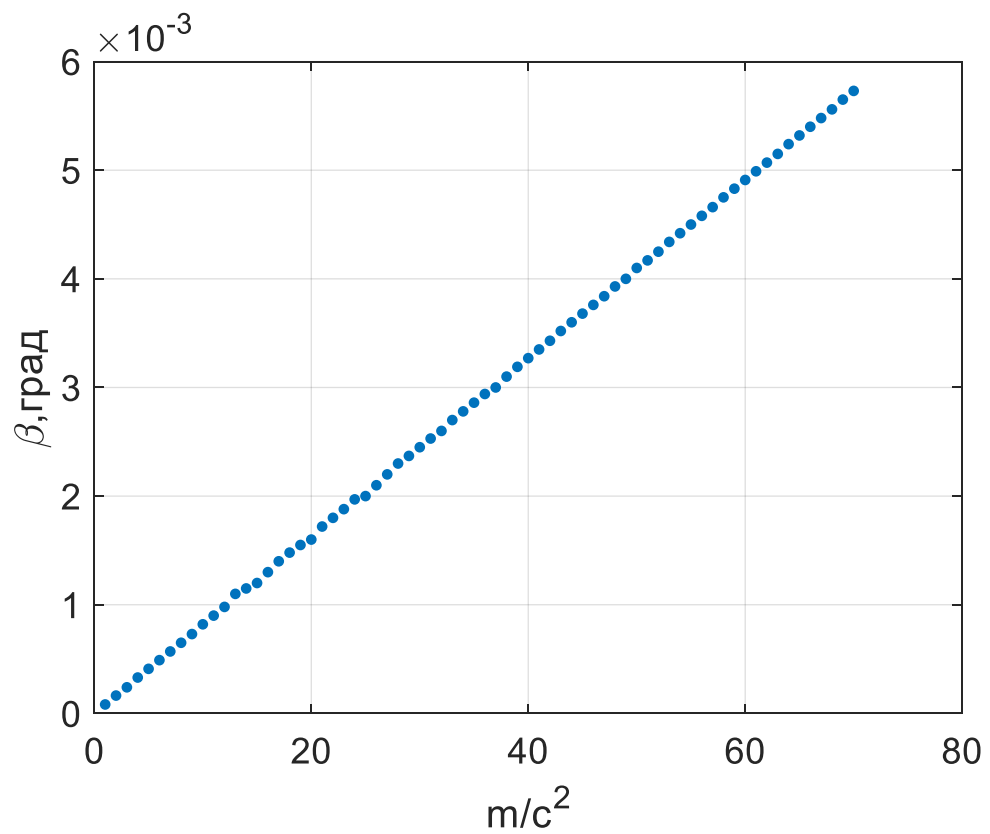


Рис. 2.5 Залежність усталеного значення кута від кутової швидкості обертання

З рис.2.5 видно, що чутливий елемент, виконаний по компенсаційній схемі, відхиляється на невеликий кут, що цілком забезпечується конструкцією гіровузла.

ВИСНОВКИ

При роботі над дипломним проектом було розглянуто декілька схем побудови вимірювачів кутової швидкості. Для рішення поставленої задачі, а саме – розрахунку і проектування датчика кутової швидкості із заданими вихідними даними (маса датчика, максимальна і мінімальна вимірювана ним кутова швидкість, максимальна допустима похибка), обрано схему ДКШ з електричною пружиною.

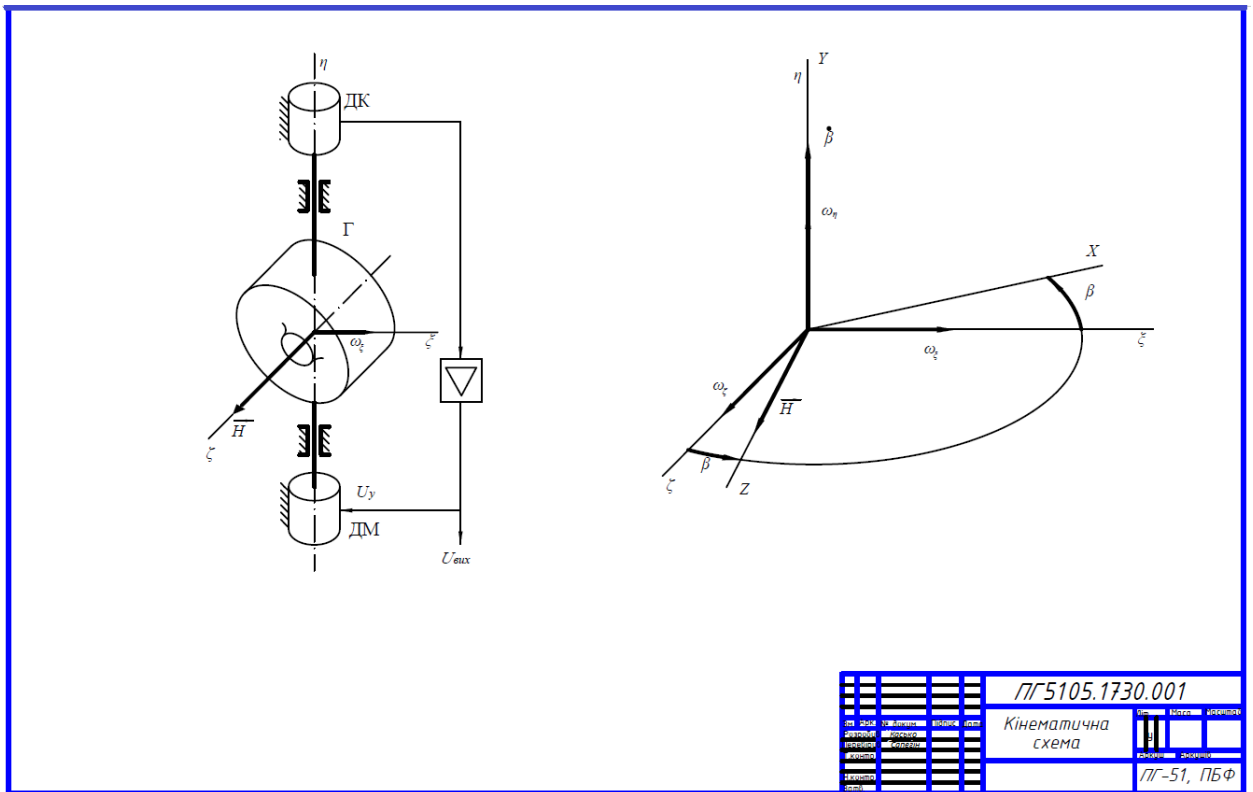
У проекті наведено обґрунтування вибраної конструктивної схеми, а також розглянуто її переваги. Наводиться опис розробленої конструкції, розрахунок та вибір необхідних конструктивних параметрів чутливого елемента. Проведено аналіз інструментальних та динамічних похибок, розглянуто причини виникнення основних значимих похибок та методи їх усунення.

Складено програмну модель приладу в системі Matlab та проведено імітаційне моделювання.

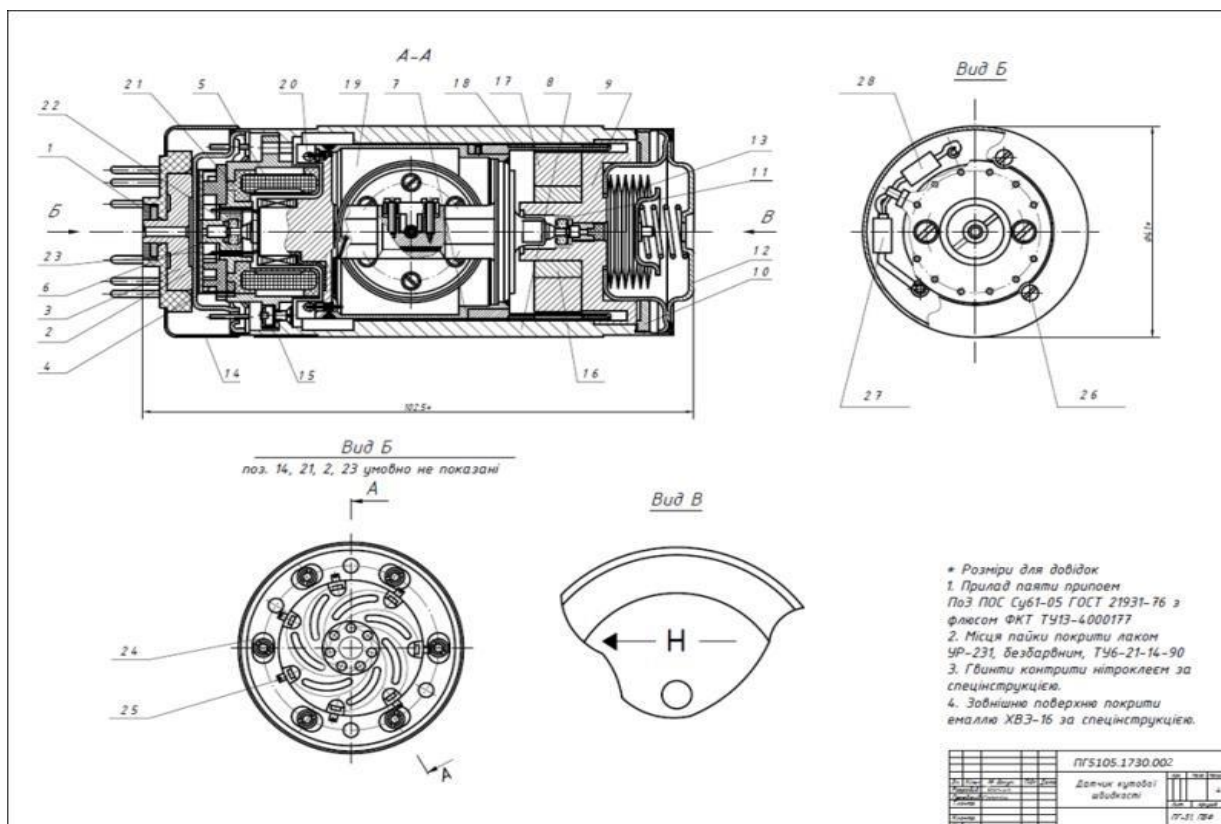
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Одинцов А.А. Теория и расчет гироскопических приборов. - Киев: Высшая школа. Главное издательство, 1986.
2. Никитин Е.А., Балашова А.А. Проектирования дифференцирующих и интегрирующих гироскопов и акселерометров. – М.: Машиностроение, 1969.
3. Одинцов А. А. Компенсационные гиротаксометры. – К.: КПИ, 1969. – 118с.
4. С.Ф. Коновалов, Е.А. Никитин, Л.М. Селиванова. Гироскопические системы. Проектирование гироскопических систем. Часть III, Акселерометры, датчики угловой скорости. Под ред. Д.С. Пельпора. -М. Высш. школа, 1980.
5. Бондар П.М. Вимірювальні перетворювачі, прилади та системи (конспект лекцій)
6. *Пельпор Д. С. и др.* Гироскопические системы. – М.: Высш. шк., 1971 – 488с.
7. *Пельпор Д. С. и др.* Гироскопические системы. Проектирование гироскопических систем: В 2-х ч. – М.: Высш. шк., 1977. – Ч. 1 – 2.

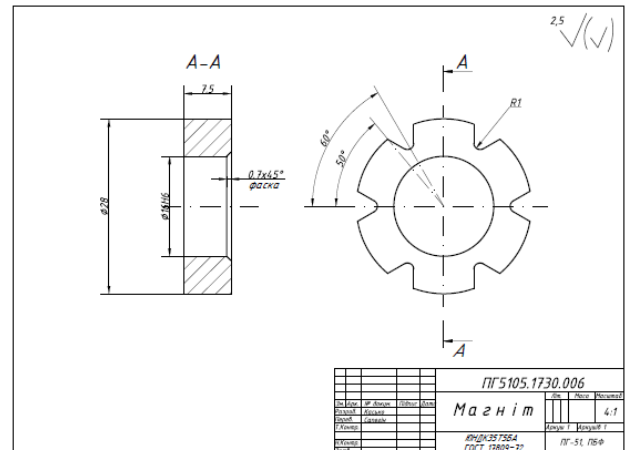
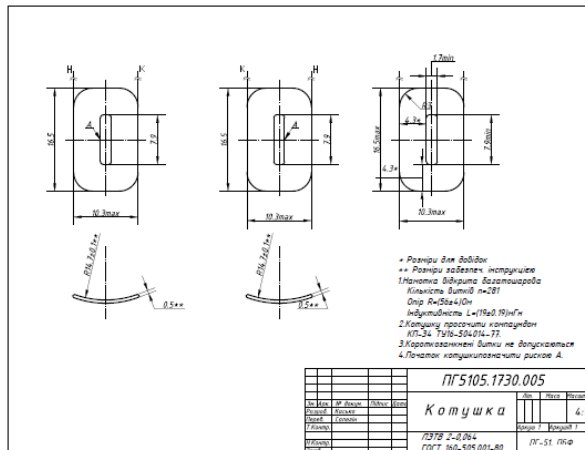
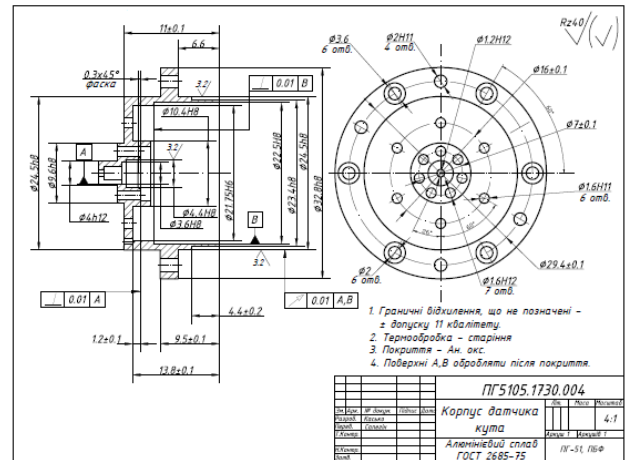
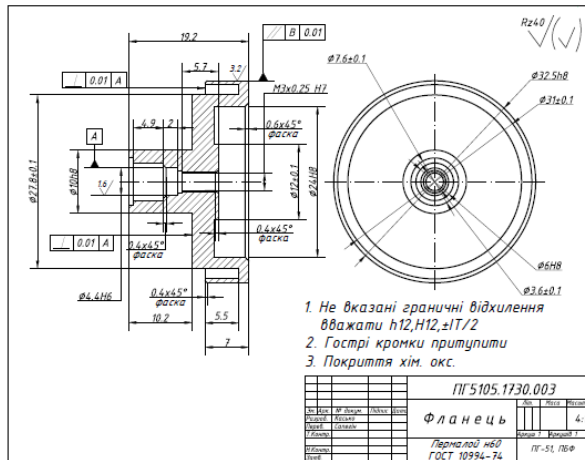
Додаток 1



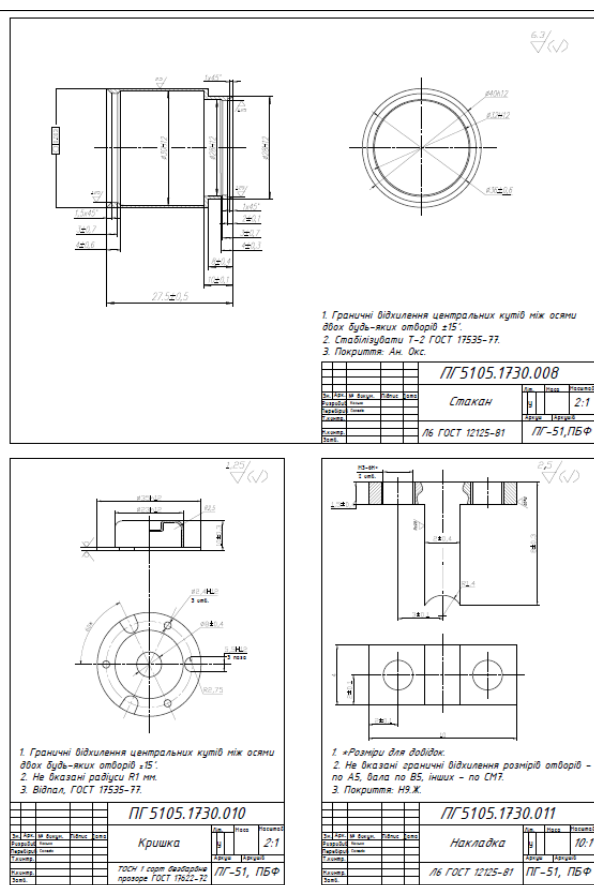
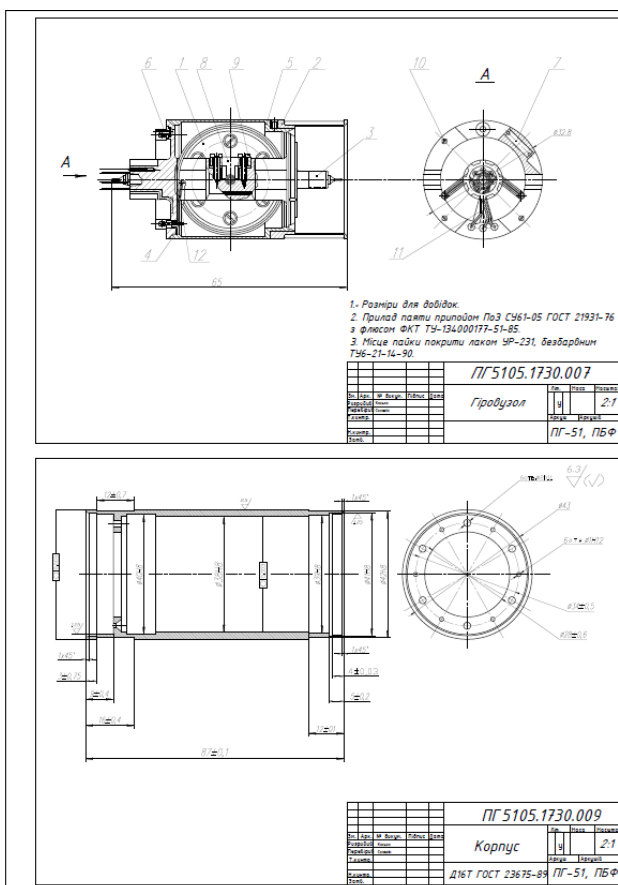
Додаток 2



Додаток 3



Додаток 4



Додаток 5

[illegible]

Додаток 6

Формат	Зона	Позиція	Позначення	Найменування	Кількість	Примітка
				<u>Документація</u>		
А			ПГ 5105.1730.001	<u>Складальне креслення</u>		
				<u>Деталі</u>		
А3	1		ПГ 5105.1730.001	Панель	1	
	2		ПГ 5105.1730.001	Заглушка	1	
	3		ПГ 5105.1730.001	Панель	1	
	4		ПГ 5105.1730.001	Плата	1	
	5		ПГ 5105.1730.001	Статор датчика кута	1	
	6		ПГ 5105.1730.001	Торсіон	1	
	7		ПГ 5105.1730.001	Поплавок	1	
	8		ПГ 5105.1730.009	Корпус	1	
	9		ПГ 5105.1730.001	Датчик моменту	1	
	10		ПГ 5105.1730.001	Панель	1	
	11		ПГ 5105.1730.001	Підшипник скользяння	1	
	12		ПГ 5105.1730.001	Планка	1	
	13		ПГ 5105.1730.001	Сильфон	1	
	14		ПГ 5105.1730.001	Кришка	1	
	15		ПГ 5105.1730.001	Прокладка	1	
	16		ПГ 5105.1730.006	Магніт датчика кута	1	
	17		ПГ 5105.1730.001	Юбка	1	
	18		ПГ 5105.1730.007	Гіровузол	1	
	19		ПГ 5105.1730.001	Штифт	1	
	20		ПГ 5105.1730.009	Корпус	1	
	21		ПГ 5105.1730.001	Камінь підшипника	1	
	22		ПГ 5105.1730.010	Кришка	1	
				ПГ 5105.1730.013		
Вн.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дат.		
Розробив	Косиць				Літ.	Архив
Перевірив	Саварін				1	2
Н.контр.					ПГ-51, ПБФ	
Зам.						
				Датчик кутової швидкості		

[illegible]